

UNIVERSITÉ DE SHERBROOKE
Faculté de génie
Département de génie civil

Étude sur la poudre de verre de source électronique et le contrôle de l'expansion due à la RAS dans les bétons architecturaux contenant des granulats de verre

Mémoire de maîtrise
Spécialité : Génie civil

Étienne DUMAS MORIN

Jury : Arezki TAGNIT-HAMOU (Directeur)
 Carmel JOLICOEUR
 Ammar YAHIA(Rapporteur)

À ma mère, à mon père

RÉSUMÉ

L'utilisation mondiale du béton est en constante augmentation, ce qui signifie une augmentation de la consommation des ressources naturelles liées à la production du béton. Comme ces ressources sont limitées, il faut chercher des matériaux alternatifs à l'utilisation de la pierre, du sable et du ciment pour soutenir l'industrie. Au Québec, une alternative à ces matériaux est le verre. Le verre peut être utilisé tant en remplacement du ciment qu'en remplacement des granulats.

La source alternative de verre la plus connue est le verre de bouteille post-consommation, mais une nouvelle source croît en importance depuis quelques années. En effet, avec les progrès rapides de la technologie de verre post-consommation issue de l'industrie de l'électronique peut être une source intéressante. Une des phases de ce projet est la caractérisation de la poudre de verre électronique (PVE) en tant qu'ajout cimentaire. Les essais réalisés avec ce matériau montrent que le comportement de la PVE a un comportement semblable à la poudre de verre de bouteilles tant au niveau des résistances à la compression que de la durabilité.

L'autre phase du projet vise à utiliser les granulats de verre de bouteilles post-consommation. L'utilisation de verre apporte un aspect architectural très intéressant. Cependant, ce matériau a un inconvénient majeur, il est très sensible à la réaction alcalis-silice (RAS). Cette réaction entraîne une dégradation prématurée du béton. Cette phase du projet a été concentrée sur l'élimination de la RAS dans les bétons avec granulats de verre tout en conservant l'aspect architectural. Une grande série de mortiers a été réalisée afin de déterminer les combinaisons de matériaux cimentaires les plus efficaces. Le ciment GU, GU pale, GU à faible teneur en alcalis, le ciment blanc, les cendres volantes, le métakaolin et la poudre de verre ont été évalués. Les mélanges les plus efficaces sont le ciment GU avec 30 % de cendres volantes pour un mélange binaire ou 30 % de cendres volantes et 5 % de métakaolin pour un mélange ternaire. Des bétons ont été faits avec ces combinaisons et les résultats montrent que les granulats de verre nuisent à la maniabilité du béton, mais que l'expansion due à la RAS est réduite de plus de 90 % pour les bétons fait selon la norme CSA A23.2-14A et ceux inspirés de l'industrie.

Mots-clés : Verre mixte – Réaction alcalis silice – Bétons architecturaux – Verre électronique – Durabilité – Matériaux cimentaires alternatifs.

REMERCIEMENTS

Je tiens à remercier mon directeur de mémoire le Professeur Arezki-TAGNIT-HAMOU, pour sa disponibilité, ses conseils, son support technique et moral tout au long de mon projet.

Je souhaite également remercier Ablam ZIDOL, pour sa grande disponibilité, le support et les conseils qu'il m'a apportés pendant cette étude.

Je remercie le personnel du Groupe, les professeurs, les professionnels de recherche du groupe principalement David HARBEC pour son support lors des essais de caractérisation au MEB, les techniciens, dont Claude FAUCHER, Rajko VOJNOVIC et Denis BOLDUC.

Je remercie également mes amis et collègues du Groupe pour les coups de main et leur présence, particulièrement William WILSON pour son aide avec les granulats de verre et ses conseils toujours à point.

Je suis reconnaissant envers Michel LESSARD pour le support pendant la fin de mon projet.

Finalement, j'adresse mes sincères remerciements à mes parents et ma sœur pour les encouragements, le support moral et leur aide pendant mes études. J'en suis très reconnaissant.

TABLE DES MATIÈRES

RÉSUMÉ	i
REMERCIEMENTS	iii
LISTE DES FIGURES	ix
LISTE DES TABLEAUX	xiii
LISTE DES SYMBOLES	xvii
LISTE DES ACRONYMES	20
CHAPITRE 1 INTRODUCTION	1
CHAPITRE 2 SYNTHÈSE BIBLIOGRAPHIQUE	6
2.1 Les verres	6
2.1.1 Généralités	6
2.1.2 Recyclage du verre	6
2.2 Le verre en tant qu'ajout cimentaire	7
2.2.1 Réaction pouzzolanique	8
2.3 Effet de la poudre de verre sodocalcique sur les propriétés du béton	8
2.3.1 Amélioration des performances	8
2.3.2 Amélioration de la durabilité	9
2.3.3 La perméabilité aux ions chlorure	9
2.3.4 Le réseau d'air dans le béton durci	12
2.3.5 La résistance aux cycles de gel/dégel	13
2.3.6 La résistance à l'écaillage	15
2.3.7 La réaction alcalis-granulats	16
2.4 Effet de la poudre de verre de source électronique sur les propriétés du béton	18
2.5 Le verre en tant que remplacement granulaire	20
2.5.1 Effet sur les propriétés à l'état frais	20

2.5.2	Effet sur les propriétés à l'état durci	21
2.5.3	Aspect architectural	23
2.6	Réaction alcalis-silice	24
2.6.1	Définition et mécanismes	24
2.6.2	Les granulats de verre et la RAS	26
2.6.3	Effets des ajouts cimentaires	27
CHAPITRE 3	PROGRAMME EXPÉRIMENTAL ET PROCÉDURES D'ESSAIS	34
3.1	Description des matériaux	34
3.1.1	Granulats	34
3.1.2	Sable	35
3.1.3	Ciments	35
3.1.4	Poudre de verre	35
3.1.5	Poudre de verre de source électronique	36
3.1.6	Cendres volantes classe F	36
3.1.7	Métakaolin	37
3.1.8	Adjuvants chimiques	37
3.2	Caractéristiques des matériaux cimentaires	38
3.2.1	Caractéristiques physiques	38
3.2.2	Caractéristiques chimiques	40
3.3	Plan expérimental	41
3.3.1	Plan des essais réalisés	41
3.3.1	Descriptions des mélanges réalisés	41
3.4	Essais sur mortiers	45
3.4.1	Résistance à la compression sur cubes de mortiers	45
3.4.2	Résistance à la réaction alcalis granulats sur prismes de mortiers	45

3.5	Essais de caractérisation	46
3.5.1	Granulométrie laser	46
3.5.2	Analyse chimique	46
3.5.3	Microscope électronique à balayage et analyses EDS.....	47
3.6	Essais à l'état frais	48
3.6.1	Affaissement	48
3.6.2	Masse volumique.....	49
3.6.3	Teneur en air du béton frais.....	49
3.6.4	Température.....	50
3.6.5	Prélèvement des échantillons et murissement	50
3.7	Essais à l'état durci	51
3.7.1	Résistance à la compression	51
3.7.2	Résistance à la traction par fendage	51
3.7.3	Résistance en flexion.....	52
3.7.4	Module d'élasticité	53
3.8	Durabilité	54
3.8.1	Retrait de séchage.....	54
3.8.2	Résistance aux cycles de gel/dégel.....	56
3.8.3	Résistance à l'écaillage.....	56
3.8.4	Pénétrabilité des ions chlore	58
3.8.5	Résistivité électrique.....	59
3.8.6	Résistance à la réaction alcalis-granulats sur prismes de béton	60
3.8.7	Essai accéléré de carbonatation	61
3.8.8	Réseau d'air dans le béton durci.....	62
CHAPITRE 4	PRÉSENTATION, ANALYSE ET DISCUSSION DES RÉSULTATS.....	63

4.1	Étude sur l'utilisation du verre de source électronique sous forme de remplacement cimentaire dans les bétons	63
4.1.1	Mortiers	63
4.1.2	Formulation des bétons	65
4.1.3	Essais à l'état frais	66
4.1.4	Essais de propriétés mécaniques	68
4.1.5	Essais de durabilité	75
4.1.6	Conclusion partielle	88
4.2	Contrôle de la réaction alcalis-silice dans les bétons architecturaux incorporant des granulats de verre	91
4.2.1	Mortier	91
4.2.2	Microscopie électronique à balayage	99
4.2.3	Formulation des mélanges de béton	101
4.2.4	Essais à l'état frais	101
4.2.5	Essais de propriétés mécaniques et durabilité	103
CHAPITRE 5	CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS	113
BIBLIOGRAPHIE	115

LISTE DES FIGURES

Figure 1-1 : Schéma de la valorisation du verre.....	3
Figure 1-2 : exemple de bétons architecturaux incorporant des granulats de verre	5
Figure 2-1 : Perméabilité aux ions chlore (Shayan et Xu, 2006)	11
Figure 2-2 : Aspects physiques des prismes des bétons après 300 cycles (Zidol, 2009)	14
Figure 2-3 : Résistances au gel-dégel des bétons (Zidol, 2009).....	14
Figure 2-4 : Expansion due à la RAG pour différente finesse du verre (Idir, 2009).....	18
Figure 2-5 : Diffractogramme X de la PVE	20
Figure 2-6 : Variation de l'affaissement en fonction du taux de remplacement granulaire (Ramlochan et al., 2000).....	21
Figure 2-7 : Évolution des résistances à la compression pour des bétons contenant des agrégats de verre. (Ramlochan et al., 2000).....	22
Figure 2-8 : Plaques architecturales (Kateb, 2009)	23
Figure 2-9 : Représentation schématique d'un mécanisme possible entraînant des dégâts lors de la réaction alcali-silice (Sprung et Sylla, 1998).....	25
Figure 2-10 : Illustration de l'effet pessimum comme étant le résultats de deux processus (Jin et al., 2000).....	26
Figure 2-11 :Description des mélanges et résultats d'expansion due à la RAS (Hanna et al., 2014).....	29
Figure 2-12 : Expansion sur prismes de béton contant du métakaolin (Ramlochan et al., 2000)	31
Figure 2-13 : Effet de la quantité de SiO ₂ de la fumée de silice dans l'essai d'expansion accélérée sur mortier à différent niveaux de remplacement. (Boddy et al., 2003).....	32
Figure 2-14 : Expansion de prismes de bétons après deux ans d'exposition à différent taux de remplacement cimentaires (Kandasamy et Shehata, 2014)	33

Figure 3-1 : Production des granulats de verre	34
Figure 3-2 : Broyeur à boulets.....	36
Figure 3-3 : Courbe granulométrique des matériaux cimentaires utilisés.....	39
Figure 3-4 : Plan expérimental des essais réalisés	41
Figure 3-5 : Essai de résistance à la compression sur prismes de mortier	45
Figure 3-6 : Comparateur pour la mesure de la RAG sur prismes de mortier	46
Figure 3-7 : Description du fonctionnement de la fluorescence X (Eberhart, 1997; Martin et George, 1998).....	47
Figure 3-8 : Appareillage et fonctionnement de la microscopie électronique à balayage (Duval et Bouguillon, s.d.)	48
Figure 3-9 : Essai d'affaissement sur béton conventionnel.....	49
Figure 3-10 : Air-mètre pressiométrique.....	50
Figure 3-11 : Essai de résistance à la compression	51
Figure 3-12 : Essai de résistance à la traction par fendage	52
Figure 3-13 : Essai de flexion	53
Figure 3-14 : Courbe contrainte déformation du béton.....	54
Figure 3-15 : Appareil de mesure pour le retrait de séchage.....	55
Figure 3-16 : Dispositif de l'essai de pénétrabilité aux ions chlore (Gagné, 2014).....	59
Figure 3-17 : Appareil pour mesurer la résistivité électrique.....	60
Figure 3-18 : Chambre environnementale pour l'essai de RAG.....	61
Figure 3-19 : Chambre de carbonatation.....	62
Figure 4-1 : Résistance à la compression des mortiers incorporant la PVE	64
Figure 4-2 : Résistance à la compression de bétons incorporant de la PVE	69
Figure 4-3 : Résistance à la traction de bétons incorporant de la PVE	70

Figure 4-4 : Résistance à la flexion de bétons incorporant la PVE	72
Figure 4-5 : Module d'élasticité de bétons incorporant la PVE	74
Figure 4-6 : Retrait de séchage de bétons incorporant de la PVE	76
Figure 4-7 : Résistances aux cycles de gel/dégel de bétons incorporant de la PVE.....	77
Figure 4-8 : photos des essais de résistances aux cycles de gel/dégel sur des bétons incorporant de la PVE	78
Figure 4-9 : Résistance à l'écaillage ASTM 672 de bétons incorporant de la PVE.....	79
Figure 4-10 : Résistance à l'écaillage BNQ 2621-900 de bétons incorporant de la PVE.	79
Figure 4-11 : Perméabilité aux ions chlore et résistivité électrique des bétons contenant de la PVE.....	82
Figure 4-12 : Expansion causée par la RAG de bétons incorporant de la PVE	83
Figure 4-13 : Profondeur de carbonatation de bétons incorporant de la PVE	85
Figure 4-14 : Carbonatation des bétons incorporant de la PVE	86
Figure 4-15 : Comparaison de la teneur en air à l'état frais et durci des bétons incorporant de la PVE.....	87
Figure 4-16 : Facteur d'espacement et surface spécifique des bulles d'air dans les bétons contenant de la PVE	88
Figure 4-17 : RAS mortier avec ciment type GU	94
Figure 4-18 : RAS mortiers avec ciment GU faible alcalis	95
Figure 4-19 : RAS mortiers avec ciment blanc	96
Figure 4-20 : RAS mortiers avec 70% de granulats de verre	98
Figure 4-21 : Images MEB des bétons GV-SB – zone de transition.....	99
Figure 4-22 : Comparaison MEB de l'écart des zones de transition	100
Figure 4-23 : Images MEB des bétons GV-SB – gels de RAG.....	100

Figure 4-24 : Résistance à la compression de bétons avec un remplacement de 100% des granulats	104
Figure 4-25 : Résistance à la compression de bétons avec un remplacement de 100% des granulats et du sable	104
Figure 4-26 : Résistance à la compression de bétons avec un remplacement de 70% des granulats	105
Figure 4-27 : Résistivité électrique de bétons avec un remplacement de 100% des granulats	107
Figure 4-28 : Résistivité électrique de bétons avec un remplacement de 100% des granulats et du sable.....	107
Figure 4-29 : Résistivité électrique de bétons avec un remplacement de 70% des granulats .	108
Figure 4-30 : Résistance à la RAG de bétons avec un remplacement de 100% des granulats	110
Figure 4-31 : Résistance à la RAG de bétons avec un remplacement de 100% des granulats et du sable.....	111
Figure 4-32 : Résistance à la RAG de bétons avec un remplacement de 70% des granulats .	111

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 2-1 : Échelle de pénétrabilité des ions chlore (ASTM C1202).....	10
Tableau 2-2 : Description des mélanges étudiés (Shayan et Xu, 2006)	10
Tableau 2-3 : Perméabilité aux ions chlore (Tagnit-Hamou et Bengougam, 2012).....	12
Tableau 2-4 : Caractéristiques du réseau de bulles d'air des bétons $E/L = 0.40$ (Zidol, 2009).13	
Tableau 2-5 : Évaluation qualitative de l'essai d'écaillage (BNQ 2621-900).....	15
Tableau 2-6 : Résistance à l'écaillage à 28 jours d'âge (Zidol, 2009)	15
Tableau 2-7 : Résistance à l'écaillage à 91 jours d'âge (Zidol, 2009)	16
Tableau 2-8 : Composition chimique de la poudre de verre (de bouteille et électronique)	19
Tableau 2-9 : Indice de pouzzolanité de PVE (Tognonvi et Tagnit-Hamou, 2013b).....	19
Tableau 3-1 : Caractéristiques physiques des matériaux cimentaires utilisés	38
Tableau 3-2 : Composition chimique des matériaux cimentaires utilisés dans le projet.....	40
Tableau 3-3 : Description des mortiers et bétons incorporant de la poudre de verre électronique	42
Tableau 3-4 : Description des mortiers architecturaux.....	43
Tableau 3-5 : Description des bétons architecturaux.....	43
Tableau 3-6 : Évaluation visuelle des échantillons de béton soumis à l'essai d'écaillage BNQ2621-900	57
Tableau 3-7 : Évaluation visuelle des échantillons de béton soumis à l'essai d'écaillage ASTM C672	58
Tableau 3-8 : Niveau de perméabilité aux ions chlore en fonction de la charge.....	59
Tableau 3-9 : Niveau de risque de corrosion versus le niveau de perméabilité aux ions chlore	60
Tableau 4-1 : Formulation des mortiers incluant de la PVE	63

Tableau 4-2 : Indices pouzzolaniques des mortiers incorporant de la PVE.....	65
Tableau 4-3 : Formulation des bétons contenant de la PVE	66
Tableau 4-4 : Propriétés à l'état frais des bétons incorporant la PVE.....	66
Tableau 4-5 : Résultats à l'état frais sans AEA.....	67
Tableau 4-6 : Indices de pouzzolanicité de bétons incorporant de la PVE	70
Tableau 4-7 Résistance à la traction estimée des bétons incorporant de la PVE	71
Tableau 4-8 : Résistance à la flexion estimée des bétons incorporant de la PVE.....	73
Tableau 4-9 : Module d'élasticité estimé des bétons incorporant de la PVE.....	75
Tableau 4-10 : Critère d'évaluation visuelle pour l'essai de résistance à l'écaillage	81
Tableau 4-11 : Évaluation visuelle de la résistance à l'écaillage des bétons incorporant de la PVE	81
Tableau 4-12 : Réduction de l'expansion due à la RAG par rapport au témoin	84
Tableau 4-13 : Caractéristiques du réseau de bulles d'air des bétons avec PVE	87
Tableau 4-14 : Synthèse des résultats des essais sur bétons incorporant de la PVE.....	89
Tableau 4-15 : Légende du tableau de synthèse.....	89
Tableau 4-16 : Formulation des mortiers réalisés avec du ciment GU	91
Tableau 4-17 : Formulation des mortiers réalisés avec du ciment GU à faible teneur en alcalis	92
Tableau 4-18 : Formulation des mortiers réalisés avec du ciment blanc	92
Tableau 4-19 : Formulation des mortiers réalisés avec 70% de sable de verre.	93
Tableau 4-20 : Formulation des bétons réalisés	101
Tableau 4-21 : Propriétés à l'état frais	102

Tableau 4-22 : Pourcentage de réduction de l'expansion due à la RAG des bétons avec granulats de verre.....	112
---	-----

LISTE DES SYMBOLES

Symbole	Définition
b	Largeur de l'échantillon
CB	Ciment blanc
cm	Centimètre
cm ²	Centimètre carré
CRD	Lecture du comparateur
C-S-H	Calcium Silicate Hydrate
CV	Cendres volantes
d	Profondeur de l'échantillon
D	Diamètre de l'échantillon
D50	Diamètre moyen
E	Module élastique
E/L	Eau/liants
f _c	Résistance à la compression
f _t	Résistance à la traction
g	Gramme
G	Longueur initiale de l'échantillon
GPa	Gigapascal
GU	Ciment à usage général
GUFA	Ciment à usage général à faible teneur en alcalis
GUP	Ciment à usage général pâle
GV	Granulats de verre

Symbole	Définition
<hr/>	
g/m ²	Grammes par mètres carré
h	Heure
j	Jour
kg	Kilogramme
kg/m ³	Kilogramme par mètre cube
KN	Kilonewton
KΩ cm	Kilo Ohm centimètre
L	Longueur de l'échantillon
lb/10s	Livre par dix secondes
\bar{L}	L bar
m	mètre
min	Minutes
MK	Métakaolin
mm	Millimètre
mm ⁻¹	Par millimètre
MPa	Mégapascal
MPa/min	Mégapascal par minute
MPa/s	Mégapascal par seconde
m ² /kg	Mètres carrés par kilogramme
nm	nanomètre
N/mm ²	Newton par millimètre carré
N/s	Newton par seconde

Symbole	Définition
P	Charge
PV	Poudre de verre
PVB	Poudre de verre de bouteille
PVE	Poudre de verre électronique
RAS	Réaction alcalis-silice
RAG	Réaction alcalis-granulat
SB	Sable à béton
SSS	Saturé surface sec
SV	Sable de verre
VB	Verre de bouteille
VE	Verre électronique
w	Densité du béton
μm	Micromètre
μs	Microseconde
ΔL	Variation de longueur
σ	Contrainte
π	Pi
$^{\circ}\text{C}$	Degré Celsius

LISTE DES ACRONYMES

Acronyme	Définition
ACI	American Concrete Institute
AEA	Agent entraîneur d'air
ASTM	American Society for Testing and Materials
BNQ	Bureau de normalisation du Québec
CSA	Canadian Standards Association
CVVM	Chaire SAQ sur la valorisation du verre dans les matériaux
MEB	Microscope électronique à balayage
RE	Réducteur d'eau
SAQ	Société des alcools du Québec
XRF	X-ray fluorescence

CHAPITRE 1 INTRODUCTION

Depuis les années 2000, il y a une augmentation importante de la quantité de ciment produite dans le monde. En effet entre 2000 et 2012 il y a eu une augmentation de la production annuelle de ciment passant de 1,7 milliard de tonnes à 3,7 milliards de tonnes (Oss, 2013). Cette augmentation importante entraîne alors une augmentation du CO₂ émis par la production de clinker, principal composé du ciment Portland. Puisque la production d'une tonne de clinker produit environ 800 kg de CO₂ dû à la calcination à température élevée (1450 °C) des matières premières (Tognonvi et Tagnit-Hamou, 2013a).

La conscientisation des pays développés envers les émissions de CO₂ force les fabricants de ciment à trouver des alternatives afin de réduire leurs émissions tout en restant compétitifs dans l'industrie de la construction. Une des méthodes pour y parvenir est d'utiliser des ajouts cimentaires. Ces ajouts sont des matériaux composés principalement de silice amorphe qui sont ajoutés en remplacement d'une partie du ciment dans le béton. Ces matériaux siliceux sont souvent des sous-produits industriels. Les principaux ajouts utilisés dans l'industrie du béton sont les cendres volantes provenant des résidus des centrales électriques au charbon, le laitier de haut fourneau provenant de l'industrie de la sidérurgie et la fumée de silice issue de la production de silicium dans des fours à arc électrique.

L'utilisation des ajouts cimentaires a certains avantages environnementaux en plus d'améliorer les propriétés et la durabilité du béton. En effet, les ajouts cimentaires permettent de valoriser un matériau qui autrement se retrouvera directement dans les décharges ou dans des sites d'enfouissement. De plus, ces derniers permettent de réduire la quantité de ciment dans les bétons, ce qui diminue la quantité de CO₂ émise pour la production de la même quantité de béton. Ce sont deux avantages environnementaux importants liés à l'utilisation des ajouts cimentaires.

Cependant, ces matériaux ne sont pas toujours disponibles et leur transport induit des coûts supplémentaires de CO₂, ce qui peut rendre leur utilisation comme ajout cimentaire en remplacement du ciment moins intéressante.

Au Québec par exemple, très peu d'ajouts cimentaires classiques sont produits. Pour pallier ce problème, certains chercheurs se sont penchés sur des alternatives locales. C'est

dans cette optique que le professeur Arezki Tagnit-Hamou en partenariat avec la SAQ a lancé en 2004 la Chaire SAQ sur la valorisation du verre dans les matériaux (CVVM). Les travaux de cette chaire visent à valoriser le verre mixte en l'utilisant en remplacement granulaire et cimentaire dans les bétons. Car, le verre, matériau omniprésent et majoritairement composé de silice amorphe, peut potentiellement être valorisé dans le béton. En effet, entre 2008 et 2010, il y a eu une augmentation de 13,4 % de la quantité de matières reçues dans les centres de tri se chiffrant à 1 041 000 de tonnes. De cette quantité, 145 000 tonnes de verre post consommation ont été générées en 2010 (Recyc-Québec, 2014) et seulement 76 000 tonnes de ce verre ont été revalorisées. Plus de la moitié de ce verre non recyclé peut aujourd'hui être valorisé dans le béton soit comme ajout ou soit comme granulat (Idir, 2009).

Par ailleurs, le progrès rapide de la technologie entraîne la génération de résidus électroniques d'une autre nature qui pourrait peut-être constituer de nouvelles ressources exploitables en tant qu'ajout cimentaire. En effet, la production accrue d'appareils électroniques entraîne une grande quantité de rebuts, dont le verre électronique (télévision, ordinateur, téléphone portable...). Cependant, du fait de la présence d'une quantité non négligeable de métaux lourds dans ce type de verre, un nettoyage préalable est nécessaire avant sa valorisation. Des études préliminaires menées sur l'utilisation potentielle de ce type de verre dans les systèmes cimentaires ont révélé un comportement similaire (en termes d'activité pouzzolanique) avec le verre de bouteille (SAQ) lorsqu'il est réduit en poudre et utilisé comme ajout cimentaire (Tognonvi et Tagnit-Hamou, 2013b). Cependant, les effets de ce matériau sur le comportement des bétons sont mal connus. Des études plus approfondies sur l'effet du verre électronique comme ajout ou granulat sur les propriétés à l'état frais et à l'état durci et sur les propriétés de durabilité du béton sont donc nécessaires afin de valider son utilisation potentielle dans les matériaux de construction.

Ainsi, l'utilisation du verre, qu'il soit de provenance électronique ou de bouteille, dans les bétons permet de valoriser une grande quantité de matériau sans nécessairement engendrer un traitement intensif avant utilisation. Le schéma de la Figure 1-1 présente les traitements requis pour l'utilisation du verre dans les bétons. Il y a deux formes d'utilisation pour ce matériau soit sous forme de poudre de verre en remplacement d'une partie du ciment utilisé

dans les bétons ou sous forme de remplacement granulaire en remplacement de la pierre et du sable.



Figure 1-1 : Schéma de la valorisation du verre

Les déchets de verre constituent aujourd'hui un problème environnemental majeur. Même si la poudre de verre de bouteille peut s'utiliser facilement comme ajout dans le béton, l'utilisation d'autre source de verres tels que les verres électroniques reste encore une piste non exploitée. Par ailleurs, la substitution d'une partie du ciment par de la poudre de verre, quelle que soit la source (bouteille, électronique...) permet, en plus de désengorger les décharges publiques ou les sites d'enfouissement, de réduire les émissions de CO₂ liées à la production du clinker du ciment. Aussi, la substitution de la matière granulaire par des granulats de verre pourrait permettre une valorisation plus accrue dans les bétons architecturaux. La présente étude porte donc sur l'utilisation du verre dans les bétons sous différentes formes. Différentes formes veut dire que le verre utilisé provient de différentes sources soit du verre de bouteille soit du verre électronique et que le matériau est utilisé autant sous forme de poudre de verre que sous forme de granulats de verre. Mais pourquoi utiliser le verre dans les bétons? Parce que le verre est un matériau composé principalement de silice sous forme amorphe. Cette forme tend à réagir avec la chaux produite lors de l'hydratation du

ciment. Cette réaction va renforcer la pâte cimentaire et ainsi améliorer ses performances et sa durabilité.

Le premier axe du projet porte sur l'évaluation des effets de la poudre de verre électronique sur les propriétés à l'état frais et l'état durci et sur les propriétés de durabilité du béton. Ce matériau est étudié, car il y a peu d'études sur ce type de verre et son comportement dans les bétons n'est pas bien connu. Cet axe consiste donc en la caractérisation du matériau et la détermination de son potentiel comme ajout cimentaire. Différents taux de remplacement du ciment par de la poudre de verre électronique sont étudiés. Les bétons et les mortiers réalisés sont évalués sur les performances mécaniques et sur la durabilité. Cela va permettre de mieux comprendre le comportement du verre provenant de l'industrie de l'électronique et ainsi déterminer son potentiel en tant qu'ajout cimentaire.

Le deuxième axe de ce projet porte sur l'élimination de l'expansion causée par la réaction alcali-granulat dans les bétons incorporant des granulats de verre. Les granulats de verre sont utilisés principalement dans les bétons architecturaux, car l'aspect visuel du béton est grandement amélioré par la présence des morceaux de verre. Cependant, l'utilisation des granulats de verre a un effet secondaire indésirable qui est la réaction alcali-granulat. Cette réaction entraîne une fissuration et une dégradation prématurée du béton. L'utilisation de granulats de verre entraîne même une réaction plus intense que les granulats réactifs. Des études ont déjà montré qu'il est possible de contrôler et de limiter cette réaction. Cet axe du projet va donc s'inspirer de ces études, mais le but du projet est une réduction importante de l'expansion et l'élimination de la fissuration causée par la réaction alcali-granulat dans les bétons architecturaux. Les images suivantes présentent différents exemples de bétons architecturaux contenant du verre.

Les deux axes de ce projet permettent l'étude du comportement du verre de différente taille dans le béton puisque que son comportement de la taille des particules de verre.



Figure 1-2 : exemple de bétons architecturaux incorporant des granulats de verre

Comme le montrent ces images, l'aspect architectural est très intéressant et il est important de le conserver au mieux dans la formulation de bétons avec granulats de verre.

Des objectifs spécifiques s'ajoutent aux deux axes du projet :

- L'évaluation du potentiel pouzzolanique de la poudre de verre électronique
- L'optimisation du taux de remplacement de la poudre de verre électronique
- Le maintien de l'aspect architectural des bétons en incorporant des granulats de verre

CHAPITRE 2 SYNTHÈSE BIBLIOGRAPHIQUE

2.1 Les verres

2.1.1 Généralités

Selon (Zachariasen, 1932), le verre se définit comme « un solide non cristallin, présentant un phénomène de transition vitreuse ». Dans le langage courant, le verre se définit comme étant un matériau dur, fragile et transparent à la lumière visible. Cette définition ne prend en compte que les matériaux amorphes, c'est-à-dire des matériaux obtenus par refroidissement rapide, mais exclut les matériaux non cristallins. Le verre est donc obtenu par figeage de la phase liquide jusqu'à sa solidification. Il est le plus souvent constitué d'oxyde de silicium (ou silice SiO_2 , constituant principal du sable) qui lui confère son caractère amorphe et de fondants, généralement des oxydes alcalins et/ou alcalino-terreux, ayant pour rôle de baisser la température de fusion. La présence et la nature d'un fondant affecte de façon importante le produit final obtenu et ses propriétés tant physiques que chimiques. Ainsi en fonction des propriétés finales et de l'usage désirés, on ajoute au verre soit du bore (verre borosilicate (B_2O_3) (pyrex)), du plomb (PbO) (verre de cristal), du sodium (Na_2O) et calcium (CaO) (sodocalcique), ... Parmi ces verres, les verres sodocalciques, utilisés pour la fabrication de bouteilles, de flacon et de vitrage, sont les plus répandus. Ils représentent en effet, plus de 90 % de la production de verre. Par ailleurs, les éléments tels que le baryum et le strontium qui sont aussi des alcalino-terreux tout comme le calcium, sont utilisés souvent sous forme de carbonates pour augmenter l'absorption des rayons X et gamma ainsi que l'indice de réfraction sans trop augmenter l'aberration chromatique du verre de la dalle des tubes cathodes que l'on retrouve dans les postes téléviseurs, les écrans d'ordinateur, etc. L'ajout du plomb dans ce type de verre permet également une bonne protection contre les rayons X.

2.1.2 Recyclage du verre

Le verre usagé peut être soit réutilisé (système de consigne où les bouteilles sont récupérées, lavées et réutilisées) soit utilisé comme matière première (verre broyé et fondu) pour la fabrication de nouveaux verres. Ce dernier constitue l'essentiel du recyclage du verre dans le monde. En effet, lorsque le verre recyclé est collecté, il est broyé en petits morceaux, appelés calcin. Le calcin est nettoyé de tous déchets autres que du verre, rebroyé, mélangé à une petite quantité de diverses matières premières, chauffé et moulé en nouveaux modèles de

bouteilles, pots et bocaux. Ce qui permet de limiter la consommation des ressources naturelles (tels que le fuel, le sable, le calcaire ou les feldspaths). La production de verre à partir de la refonte génère moins d'émissions (oxydes de soufre, d'azote, CO₂ et poussières) et permet d'obtenir un meilleur rendement (de Louvigny, 2001).

Par ailleurs, la réutilisation du verre dans divers domaines s'est accrue ces dernières décennies afin de répondre plus au défi du développement durable. Les déchets de verre sont par exemple, utilisés comme matières premières pour la production d'abrasifs au jet de sable, comme substitut d'agrégat dans le béton, les chaussées et les stationnements. Les déchets de verre sont également employés comme matières premières dans la production des pastilles ou des perles de verre utilisées dans la peinture réfléchissante sur les routes, pour la production des fibres de verre. Quant à la poudre de verre, elle peut être utilisée comme lubrifiant, additifs de base dans la fabrication de fonderie de métaux et dans l'industrie céramique. En agriculture, une incorporation du verre pilé apporte des modifications chimiques, physiques et biologiques au sol (de Louvigny, 2001; Kouassi, 2011). Plus récemment, en raison de ses propriétés pouzzolaniques très intéressantes, la poudre de verre (de bouteille) a été introduite dans les matériaux de construction comme ajout cimentaire en remplacement d'une partie du ciment dans le béton (Idir, 2009).

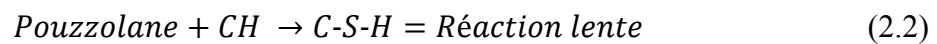
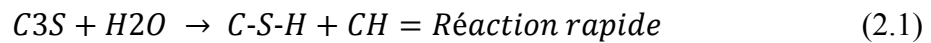
Cependant, si le verre sodocalcique ou de bouteille peut être recyclé plus ou moins facilement, il n'en demeure pas moins des verres électroniques dont le recyclage reste difficile du fait probablement de certains composants nocifs tels que les métaux lourds (ex. plomb), ce qui nécessite des traitements préalables.

2.2 Le verre en tant qu'ajout cimentaire

Le verre est un matériau amorphe dont le constituant majoritaire est la silice (50-80 %). Ce caractère amorphe lui permet de développer des propriétés pouzzolaniques intéressantes, lorsqu'il est réduit en poudre, permettant son utilisation comme ajout cimentaire au même titre que les ajouts cimentaires classiques tels que les cendres volantes.

2.2.1 Réaction pouzzolanique

Un matériau est dit pouzzolanique lorsqu'il est capable de réagir avec la portlandite formée lors de l'hydratation du ciment pour donner du gel de silicate hydraté supplémentaire entraînant ainsi un renforcement des propriétés du système cimentaire. Ainsi, lorsque le ciment Portland s'hydrate en présence d'un ajout pouzzolanique, il se produit deux réactions distinctes décrites selon les équations 1 et 2.



Trois phénomènes sont propres à la réaction pouzzolanique des ajouts cimentaires. Premièrement, il s'agit d'une réaction lente, ce qui indique que le dégagement de chaleur et le gain de résistance seront plus lents. Deuxièmement, à l'inverse de la réaction d'hydratation du ciment Portland, la réaction pouzzolanique consomme de la chaux, ce qui améliore la résistance du béton en milieu acide. Troisièmement, les produits formés par cette réaction vont remplir les pores capillaires et augmentent ainsi la résistance et l'imperméabilité du béton par affinage des pores capillaires et par affinage des grains. Ce phénomène consiste en la transformation des gros cristaux de chaux en un produit faiblement cristallisé (Tagnit-Hamou, 2014).

2.3 Effet de la poudre de verre sodocalcique sur les propriétés du béton

Le verre sodocalcique est généralement composé de 69-74 % SiO_2 , 5-12 % CaO et 12-16 % Na_2O . Sa forte teneur en silice amorphe fait de la poudre de verre un excellent ajout cimentaire.

2.3.1 Amélioration des performances

Comme mentionné précédemment, la réaction pouzzolanique est plus lente que celle du ciment Portland. Il a été montré par (Shayan et Xu, 2006) et confirmé par (Zidol, Pavoine et Tagnit-Hamou, 2012) qu'à 28 jours, les résistances à la compression sont plus faibles que celles du témoin, mais qu'à 91 jours elles sont similaires. Cela peut être dû à une légère augmentation du rapport E/C effectif lié à une plus faible teneur en ciment. Il a également été

remarqué que les résistances sont plus affectées lorsque le taux de remplacement augmente (Zidol et al., 2012).

Pour ce qui est des résistances à la traction et à la flexion, certains auteurs ont trouvé que les bétons incorporant de la poudre de verre obtiennent des résistances similaires à celles du témoin (Taha et Nounu, 2008) alors que d'autres ont observé une légère réduction de ces résistances (Shayan et Xu, 2006). Cela peut être lié à la différence entre les rapports E/L et aux différentes finesses de verre employé (Zidol, 2009).

2.3.2 Amélioration de la durabilité

Plusieurs méthodes d'essais se sont développées au cours des années afin de déterminer la durabilité des bétons face à une ou plusieurs causes de dégradations du béton. Ces méthodes ont été normalisées et sont maintenant utilisées régulièrement pour déterminer la durabilité du béton. Les principaux essais utilisés sont : la perméabilité aux ions chlorure (ASTM 1202), le réseau d'air dans le béton durci (ASTM C457), la résistance au gel-dégel (ASTM C666), la résistance à l'écaillage (BNQ 2621-900) et la réaction alcalis-granulats (CSA A23.3-14A).

2.3.3 La perméabilité aux ions chlorure

La mesure de la perméabilité aux ions chlorure donne un aperçu rapide sur la durabilité du béton. Elle est exprimée ici par la charge électrique (en coulombs) de diffusion d'une solution saturée en ions chlorure au travers d'un échantillon de béton. Cet essai est réalisé en suivant la norme ASTM C1202. Les échantillons utilisés ont 100 mm de diamètre et 50 mm d'épaisseur. Les échantillons sont placés dans une cellule de sorte qu'une des faces baigne dans une solution à 3 % de chlorure de sodium (NaCl) où se trouve la cathode et l'autre face baignant dans une solution d'hydroxyde de sodium (0,3 N de NaOH) où se trouve l'anode, ce qui boucle le circuit. L'essai a une durée de 6 h pendant laquelle une différence de potentiel de 60 volts est maintenue entre les électrodes. L'essai consiste à mesurer la charge électrique en coulombs pendant 6 h. La charge mesurée montre la pénétrabilité des ions chlorure au travers de l'échantillon. Les résultats obtenus sont comparés aux valeurs du

Tableau 2-1 qui exprime le niveau de perméabilité aux ions chlorure. Cette valeur donne un indice de l'inter connectivité des pores dans le béton. La mesure montre un effet

direct sur la durabilité, car s'il est plus difficile pour les agents agressifs de pénétrer le béton, cela veut dire que le béton a une meilleure durabilité.

Tableau 2-1 : Échelle de pénétrabilité des ions chlore (ASTM C1202)

Charge en coulombs	Pénétrabilité des ions chlore
>4000	Élevée
2000-4000	Moyenne
1000-2000	Faible
100-1000	Très faible
<100	Négligeable

(Shayan et Xu, 2006) ont effectué des études sur les performances du verre comme matériau pouzzolanique dans les bétons. Ses études ont porté sur plusieurs mélanges avec divers taux de remplacement soit du ciment, du sable ou des deux. Les mélanges utilisés sont présentés aux Tableau 2-2. Ces auteurs ont réalisé des essais de perméabilité aux ions chlore sur ces mélanges dont les résultats sont présentés à la Figure 2-1.

Tableau 2-2 : Description des mélanges étudiés (Shayan et Xu, 2006)

Numéro de mélange	Description
Mix 1	Mélange de référence
Mix 2	10 % de fumée de silice
Mix 3	20 % de poudre de verre
Mix 4	30 % de poudre de verre
Mix 5	10 % de fumée de silice et 50 % de sable de verre
Mix 6	20 % de poudre de verre et 50 % de sable de verre
Mix 7	30 % de poudre de verre et 40 % de sable de verre
Mix 8	30 % de poudre de verre et 75 % de sable de verre
Mix 9	50 % de sable de verre
Mix 10	50 % de sable de verre et 30 % de poudre de verre en remplacement du sable fin

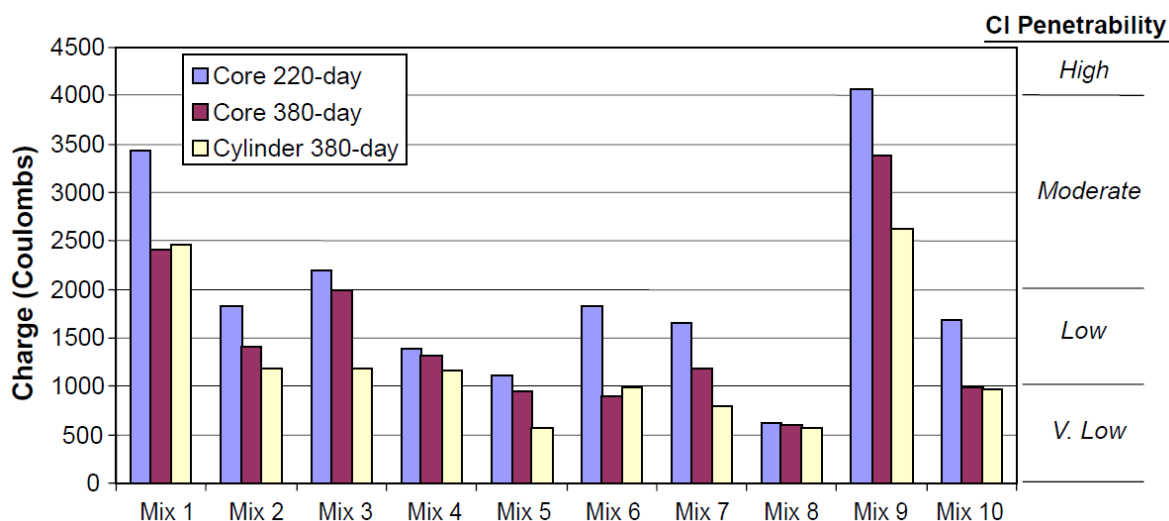


Figure 2-1 : Perméabilité aux ions chlore (Shayan et Xu, 2006)

Selon (Shayan et Xu, 2006), la perméabilité aux ions chlore des mélanges qui contiennent de la poudre de verre (3, 4, 6, 7, 8 et 10) est beaucoup plus faible que le mélange de référence et est similaire aux mélanges contenant de la fumée de silice. Il est mentionné que les cylindres muris à l'humidité ont montré de meilleures performances que les échantillons prélevés sur une dalle expérimentale. Cela indique que la poudre de verre peut être intéressante afin de contrer la pénétrabilité des chlorures dans les bétons armés en conditions submergées (Shayan et Xu, 2006). Il est également possible de voir que les mélanges 4 et 7 ont une perméabilité plus faible que les mélanges 3 et 6, ce qui indique qu'un pourcentage de remplacement du ciment par la poudre de verre plus élevé est plus efficace pour réduire la perméabilité aux ions chlore.

Des essais réalisés à l'Université de Sherbrooke ont démontré des résultats similaires. En effet dans une publication de Concrete International du mois de mars 2012, les résultats présentés pour des mélanges contenant 10 à 30 % de remplacement du ciment par la poudre de verre sont beaucoup plus faibles que pour les témoins (Tagnit-Hamou et Bengougam, 2012). Les résultats obtenus sont présentés au Tableau 2-3. La perméabilité du mélange 20 % GP-2 est beaucoup plus faible que celle du témoin. Ces résultats ont également été confirmés par (Zidol et al., 2012). Ces auteurs qui ont considéré une large gamme de rapport eau/liant ($E/L = 0,35-0,65$), ont montré que la poudre de verre, tout comme la cendre volante de classe F, performe mieux, en termes de résistance à la pénétrabilité des ions chlore) que le témoin, et

ceci quel que soit le rapport eau/liant considéré. Selon ces auteurs, cette résistance est autant meilleure que le rapport E/L est élevé.

De plus, les pourcentages plus élevés en poudre de verre montrent des perméabilités plus faibles ce qui améliore la durabilité des mélanges de béton (Tagnit-Hamou et Bengougam, 2012; Zidol et al., 2012).

Tableau 2-3 : Perméabilité aux ions chlore (Tagnit-Hamou et Bengougam, 2012)

Rapid chloride permeability test (ASTM C1012)

Concrete mixtures	28 days	56 days	91 days
GP20-2 (sidewalk)	2245	1290	987
Control2 (sidewalk)	—	3409	2818
GP10 (wall)	6030	5025	3562
GP30 (wall)	2742	1681	1236
Quat10 (sidewalk)	—	1658	—

Ces bonnes performances de la poudre de verre face à la pénétrabilité des ions chlore pourrait s'expliquer par le fait que la poudre de verre va se loger dans les pores et pendant l'hydratation, ces pores vont diminuer de volume entraînant la diminution de leur connectivité. Ce phénomène augmente grandement la durabilité des bétons, car il n'y a plus de chemin préférentiel (pores connectés) que les agents agressifs peuvent emprunter (Tagnit-Hamou, 2013).

2.3.4 Le réseau d'air dans le béton durci

Le réseau d'air dans le béton durci ou L-bar consiste à mesurer à l'aide d'un microscope les caractéristiques du réseau d'air entrainé. Cet essai est réalisé selon la norme ASTM C457. Ces caractéristiques sont déterminées sous forme du facteur d'espacement L qui représente la demi-distance entre deux bulles d'air, la surface spécifique des bulles d'air (α) et le volume qu'elles occupent en pourcentage. La caractéristique L est étroitement liée au diamètre des bulles d'air. Ce paramètre est également lié à la résistance aux cycles de gel/dégel, car plus la distance entre les bulles d'air est proche, plus il sera facile pour l'eau d'atteindre ces bulles avant que la glace ne se forme.

Des essais de détermination du réseau d'air ont été réalisés sur des bétons contenant de la poudre de verre (Zidol, 2009). Le Tableau 2-4 présente les caractéristiques du réseau d'air

des mélanges étudiés par (Zidol, 2009). Les mélanges qu'il a réalisés pour ses travaux sont 20 et 30 % de remplacement cimentaire avec un broyage de 6 ou 9 fois 25 minutes.

Tableau 2-4 : Caractéristiques du réseau de bulles d'air des bétons E/L = 0.40 (Zidol, 2009)

Grandeurs caractéristiques	Mélanges				
	Témoin	20% 6×25	30% 6×25	20% 9×25	30% 9×25
Volume d'air état frais (%)	5,2	5,5	6,0	6,1	8,0
Volume d'air état durci (%)	2,0	3,5	3,0	2,6	4,6
Surface spécifique (1/mm)	16,7	18,9	21,6	23,5	29,1
Facteur d'espacement \bar{L} (μm)	445	327	286	295	177

Les résultats montrent des pertes significatives d'air entre l'état frais et l'état durci. La norme CSA A23.1 recommande un facteur d'espacement maximum de 230 μm. Le témoin est largement supérieur à cette exigence avec un facteur de 445 μm. Les mélanges avec poudre de verre sont plus faibles, mais tous les mélanges à l'exception du mélange avec 30 % 9 x 25 ont des facteurs d'espacement supérieurs à 230 μm. Les surfaces spécifiques de tous les mélanges à l'exception du 30 % 9 x 25 sont inférieures à 25 mm⁻¹. Ces résultats ne reflètent pas de bonnes caractéristiques du réseau d'air dans le béton durci (Zidol, 2009).

2.3.5 La résistance aux cycles de gel/dégel

La résistance au gel-dégel est déterminée à partir de la norme ASTM C666. L'essai est réalisé sur des poutres de 75 x 75 x 350 mm. Le premier cycle est appliqué à 14 jours. Les échantillons subissent six cycles par jours passant d'une température de -18 à + 4 degrés Celsius. Le facteur de durabilité est déterminé par la mesure de perte de masse, les déformations longitudinales et le temps de passage d'une onde ultrasonore. Les essais de résistance aux cycles de gel/dégel réalisés par (Zidol, 2009) sont présentés à la Figure 2-2 pour ce qui est de l'aspect visuel des échantillons et à la Figure 2-3 pour ce qui est du facteur de durabilité.

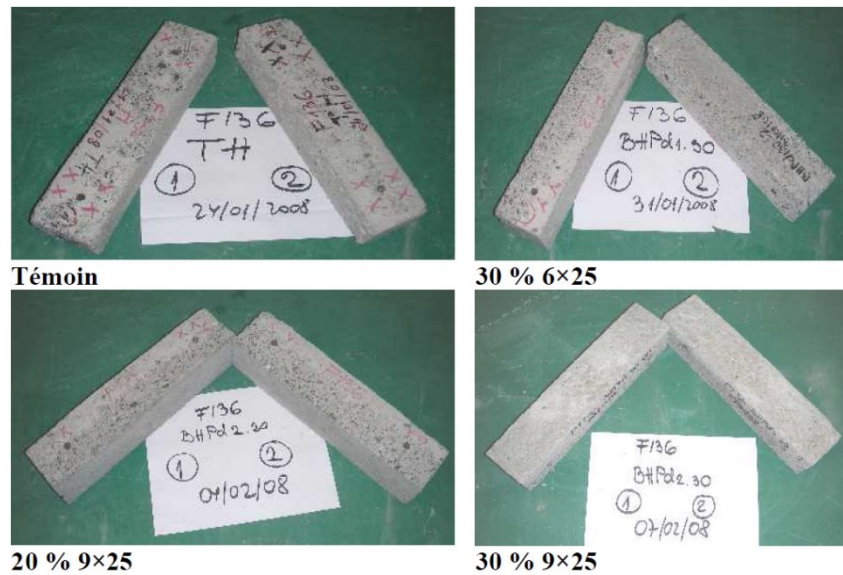


Figure 2-2 : Aspects physiques des prismes des bétons après 300 cycles (Zidol, 2009)

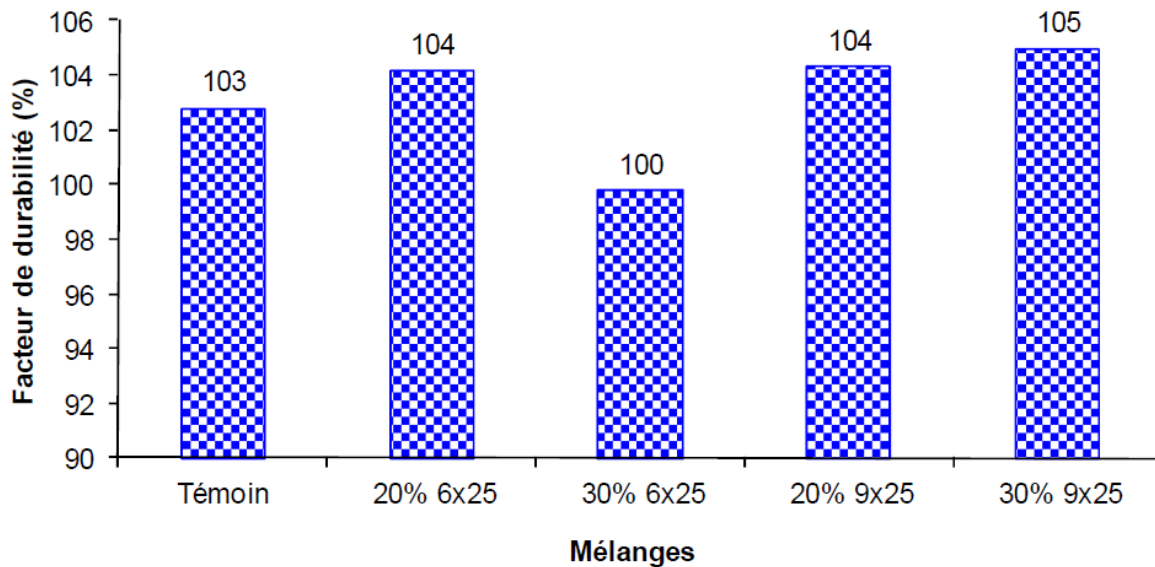


Figure 2-3 : Résistances au gel-dégel des bétons (Zidol, 2009)

L'aspect visuel des bétons contenant la poudre de verre présente moins de fissures que le témoin. Pour ce qui est du facteur de durabilité, tous les mélanges ont un facteur égal ou supérieur à 100 %, ce qui est largement supérieur au 60 % recommandé que la norme ASTM C666. Même si le facteur d'espacement est élevé, les mélanges avec poudre de verre présentent un excellent facteur de durabilité (Zidol, 2009). (Shi, Wu, Riefler et Wang, 2005) ont également trouvé que les bétons légers autoplaçants contenant la poudre de verre développent également une bonne résistance au gel/dégel.

2.3.6 La résistance à l'écaillage

Cet essai est réalisé en suivant la norme BNQ 2621-900. Les échantillons utilisés sont des plaques d'au moins 500 cm² de surface. La procédure de l'essai pour l'échéancier de 28 jours, par exemple, est le suivant : à 14 jours, il faut sortir les échantillons de la chambre humide et les conserver à l'air dans une chambre à température et humidité contrôlée. Le cadrage est installé à 21 jours et la solution saline est ajoutée à 28 jours. La solution est conservée jusqu'au début des cycles de gel/dégel à 35 jours. Chaque cycle a une durée de 24 h, dont une période de gel de 16 h \pm 1 h à une température de -18 °C. Cette période est suivie d'un dégel de 8 h \pm 1 h à une température de 23 °C. Les échantillons sont soumis à un total de 56 cycles. Pour faire la mesure de l'écaillage, il faut rincer la surface de l'échantillon avec une eau pure afin d'enlever tous les débris qui vont être ensuite lavés et filtrer au tamis 80 μ m. Ces débris sont ensuite séchés à l'étuve et pesés. Les résultats obtenus sont exprimés en g/m². Une mesure est prise à 7, 21, 35 et 56 cycles. Une fois chaque mesure terminée, une inspection visuelle de la surface doit être effectuée afin de déterminer le type d'écaillage obtenu. L'évaluation de l'écaillage est réalisée en utilisant le barème du Tableau 2-5.

Tableau 2-5 : Évaluation qualitative de l'essai d'écaillage (BNQ 2621-900)

Cote	Évaluation visuelle de la surface écaillée
0	Aucun écaillage significatif observé
1-A	Écaillage très léger du mortier de surface avec absence de cratères
1-B	Écaillage important du mortier de surface avec absence de cratères
2-A	Aucun écaillage significatif du mortier de surface mais présence de quelques cratères
2-B	Aucun écaillage significatif du mortier de surface mais présence de plusieurs cratères
3	Combinaison du mortier de surface écaillé principalement avec de gros granulats éclatés
4	Combinaison de gros granulats éclatés principalement avec du mortier de surface écaillé

Les résultats des essais de résistances à l'écaillage obtenus par (Zidol, 2009) sont présentés au Tableau 2-6 pour l'essai à 28 jours et au Tableau 2-7 pour l'essai à 91 jours.

Tableau 2-6 : Résistance à l'écaillage à 28 jours d'âge (Zidol, 2009)

Nombre de cycle	Perte de masse g/m ²									
	Témoin		20% 6×25		30% 6×25		20% 9×25		30% 9×25	
	quantité	Cote visuel	quantité	Cote visuel	quantité	Cote visuel	quantité	Cote visuel	quantité	Cote visuel
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7	24	0	66	0	46	0	118	1a	52	0
21	120	1a	161	1a	245	1a	158	1a	145	1a
35	217	1a	265	1b	568	1b	183	1a	202	1a
56	329	1a	352	1b	758	1b & 2a	224	1b	293	1a à 1b

Tableau 2-7 : Résistance à l'écaillage à 91 jours d'âge (Zidol, 2009)

Nombre de cycle	Perte de masse g/m ²									
	Témoin		20% 6×25		30% 6×25		20% 9×25		30% 9×25	
	quantité	Cote visuel	quantité	Cote visuel	quantité	Cote visuel	quantité	Cote visuel	quantité	Cote visuel
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7	15	1a	35	1a	63	1a	72	1a	82	1a
21	46	1a	98	1a	161	1a	114	1a	126	1a
35	65	1a	141	1a	223	1a	147	1a	159	1a
56	78	1a	186	1b	252	1b	184	1b	189	1a

Les résultats de (Zidol, 2009) montrent que selon l'échelle dévaluation de la norme BNQ 2621-900, tous les mélanges à l'exception du mélange 30 % 6 x 25 ont un écaillage léger de surface avec absence de cratères. Pour ce qui est du mélange 30 % 6 x 25, l'écaillage est classé comme étant relativement élevé. À 91 jours, tous les mélanges avec poudre de verre ont montré une perte de masse plus élevée que le témoin, mais quand même sous la limite maximale de la norme qui est de 500 g/m².

2.3.7 La réaction alcalis-granulats

(Schwarz, Cam et Neithalath, 2008) ont trouvé que la poudre de verre peut réduire l'expansion due à la réaction alcalis-granulats. Ces auteurs ont réalisé des essais sur des mélanges avec 5 %, 10 % et 20 % de remplacement du ciment par la poudre de verre. D'autres

mélanges contenant le même taux de remplacement, où le ciment est remplacé par la cendre volante qui est un des ajouts cimentaires les plus utilisés, ont été faits. Une des combinaisons de ces ajouts a également été réalisée. Les résultats obtenus par (Schwarz et al., 2008) montrent que la cendre volante a un meilleur potentiel de réduction de l'expansion due à la réaction alcalis-granulats pour un même taux de remplacement. La combinaison des ajouts montre des propriétés intéressantes. En effet, toute combinaison cumulant un total de 20 % de remplacement du ciment a sensiblement la même capacité de réduction de l'expansion que 20 % de cendre volante en remplacement. Ce qui signifie que la poudre de verre avec un peu d'aide de la cendre volante parvient à réduire aussi efficacement l'expansion due à la réaction alcalis granulats.

(Idir, 2009) a fait des études sur l'effet du verre sur la réaction alcalis-granulats. Ces recherches ont porté sur le verre de différentes finesses. La catégorie de verre la plus grossière (C1) a une finesse de $2.2 \text{ m}^2/\text{kg}$ et la plus fine (C8) a une finesse de $540 \text{ m}^2/\text{kg}$, qui est plus fine que le ciment. La Figure 2-4 montre l'effet de la finesse du verre sur des mortiers. La classe C8 montre une expansion de 0,03 % comparée à la classe C1 qui a une expansion de 0,61 %. Ceci montre que la finesse du verre a un effet important sur le potentiel d'expansion due à la réaction alcalis-granulats. Une finesse élevée réduit grandement l'expansion, ce qui indique que la poudre de verre avec une finesse de l'ordre de celle du ciment a des propriétés qui permettent de réduire la réaction alcalis-granulat.

(Taha et Nounu, 2009) ont observé que la poudre de verre peut réduire l'expansion causée par la RAS. Leur hypothèse est que les alcalis du béton servent d'activateur pour hydrater le verre et sont donc consommés par cette réaction. Ils ne sont plus disponibles pour la RAS plus tard.

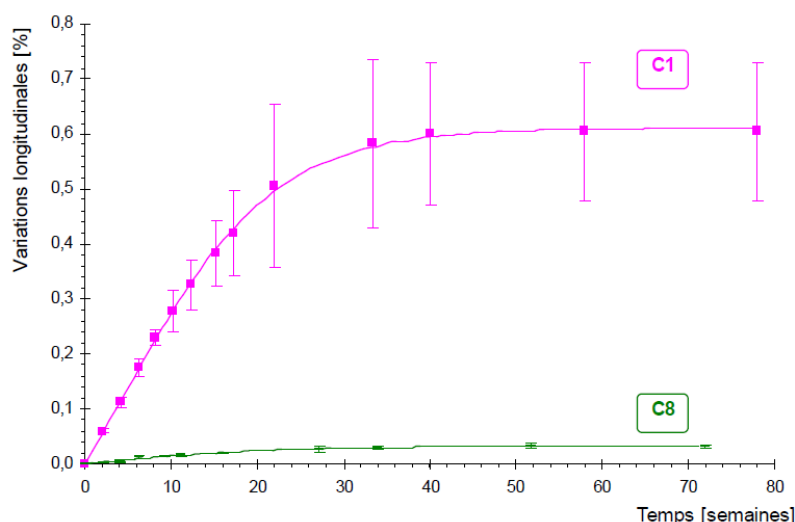


Figure 2-4 : Expansion due à la RAG pour différente finesse du verre (Idir, 2009)

2.4 Effet de la poudre de verre de source électronique sur les propriétés du béton

Contrairement à la poudre de verre sodocalcique, il existe très peu d'études qui portent sur l'utilisation de la poudre de verre électronique (PVE) dans les systèmes cimentaires. De plus, la composition de ce type de verre varie beaucoup (comme illustré au Tableau 2-8), rendant quasi impossible la généralisation des conclusions d'une étude à une autre. (Chen, Huang, Wu et Yang, 2006), qui ont étudié l'effet de PVE (E-glass) sur les propriétés du béton ont montré qu'elle améliore les performances à long terme. Selon ces auteurs, l'utilisation de PVE entraîne une diminution de l'affaissement avec l'augmentation du taux de remplacement du ciment. Cependant, cet ajout cimentaire améliore grandement la résistance au sulfate, les résistances à la compression et diminue la perméabilité aux ions chlore, ce qui améliore la durabilité des bétons (Chen et al., 2006). Cependant, comme ci-dessus mentionné, les conclusions de cette étude peuvent difficilement être utilisées dans ce projet, car la composition du verre utilisé pour cette étude est très différente de celle qui est utilisée dans ce projet (Tableau 2-8). On peut donc s'attendre à ce que les résultats qui sont obtenus soient différents de ceux présentés dans l'étude. Cependant (Chen et al., 2006), montre qu'il y a un potentiel pour ce type de verre et que cette voie doit être poursuivie. La poudre de verre électronique utilisé dans ce projet a une composition chimique similaire à celle de la poudre de verre de bouteille utilisée par l'université de Sherbrooke. Cependant, la PVE contient du

strontium et du baryum comme éléments alcalino-terreux contrairement à la PV qui contient du calcium. De plus, même si les deux poudres de verres ont une teneur en alcalis équivalents d'environ 15 %, PV ne contient que Na_2O tandis que PVE contient autant Na_2O que K_2O .

Tableau 2-8 : Composition chimique de la poudre de verre (de bouteille et électronique)
Source : 1 - U de S groupe béton 2013; 2 - Chen et Huang 2006; 3 - Dumas Morin 2014

Oxyde	Na2O	MgO	Al2O3	SiO2	K2O	CaO	SrO	BaO	Na2O + K2O	mineurs
PV 2013¹	13.71	0.81	2.01	70.14	0.52	11.29	0.03	0.07	14.23	0.72
PVE 2014²	8.02	0.09	2.09	60.75	6.95	1.38	9.00	7.37	14.97	4.15
E-glass³	-	4.50	15.00	54.00	-	17.00	-	-	0.80	-

Par ailleurs, une étude préliminaire réalisée sur la poudre de verre électronique considérée dans ce projet a montré qu'elle développe des propriétés pouzzolanique similaires à la poudre de verre sodocalcique (SAQ) (Tognonvi et Tagnit-Hamou, 2013b) même si leur composition diffère (Tableau 2-8). Dans cette étude qui consistait à évaluer la pouzzolanicité de PVE, deux granulométries ont été étudiées ($D_{50} = 12 \mu\text{m}$ et $18\mu\text{m}$). Les essais ont été réalisés sur des mortiers contenant 20 % de PVE-1 ($18 \mu\text{m}$) ou PVE-2 ($12 \mu\text{m}$) avec pour référence un mortier contenant 100 % de ciment. Les résultats reportés au Tableau 2-9, montrent que PVE développe des propriétés pouzzolaniques. Ces propriétés sont d'autant meilleures que la taille des particules est petite. En effet, pour des particules de diamètre moyen de $12 \mu\text{m}$, à 28 jours, la résistance à compression du mortier contenant PVE est plus élevée que celle du témoin (indice = 110 %). Les propriétés pouzzolaniques de PVE est probablement liées à sa teneur en silice amorphe mise en évidence par la diffraction des rayons X (Figure 2-5)

Tableau 2-9 : Indice de pouzzolanicité de PVE (Tognonvi et Tagnit-Hamou, 2013b)

Âge (jours)	Résistance en compression (MPa)			Effet pouzzolanique (%)	
	Tem	PVE-1	PVE-2	IP. PVE-1	IP. PVE-2
1	15,0	10,2	10,4	67,6	69,0
7	25,4	21,7	22,2	85,4	87,4
28	32,0	28,8	35,3	90,1	110,3

La PVE pourrait donc être utilisée comme ajout cimentaire, cependant des études supplémentaires concernant son effet sur les propriétés à l'état frais et l'état durci ainsi que sur les propriétés de durabilité du béton sont donc nécessaires, d'où l'intérêt de cette étude.

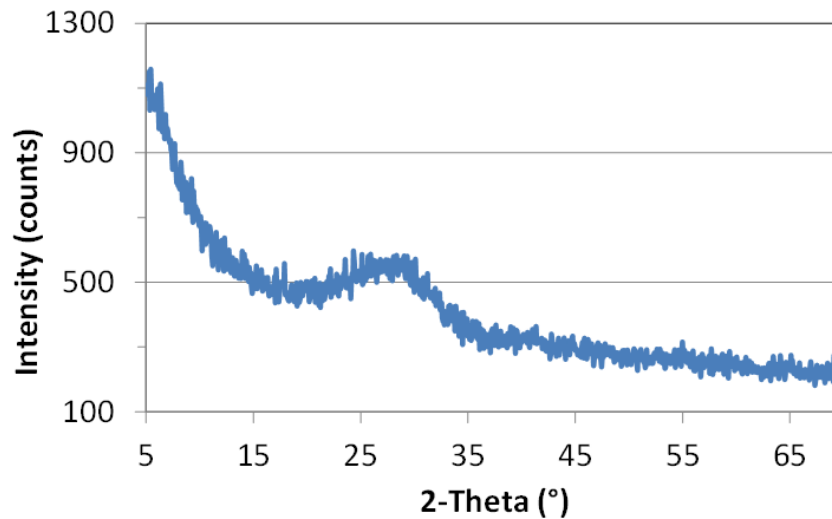


Figure 2-5 : Diffractogramme X de la PVE

2.5 Le verre en tant que remplacement granulaire

2.5.1 Effet sur les propriétés à l'état frais

Les études d'optimisation de (Kateb, 2009) ont montré que les taux de remplacement élevé des gros granulats va affecter plus l'affaissement que l'effet du remplacement des granulats fin. Cet auteur a observé une diminution de l'affaissement allant jusqu'à 30% inférieure. (Ramlochan, Thomas et Gruber, 2000) ont présenté des travaux similaires où il était observé une diminution importante de la maniabilité due au remplacement du granulat par du verre. (Figure 2-6) selon les auteurs, ceci est dû à la quantité additionnelle de pâte s'attachant au verre qui diminue la quantité de pâte disponible pour contribuer à la maniabilité du béton. L'angularité des particules de verre a également joué un rôle dans ce phénomène.

(Kateb, 2009) a remarqué que la teneur en air des bétons avec granulats de verre se situe entre 5 et 8% et ce sans ajout d'adjuvants entraîneur d'air. (Ramlochan et al., 2000) ont quant à eux observé une tendance où la teneur en air tend à augmenter avec l'augmentation du taux de remplacement. Ils ont observé une augmentation jusqu'à 40% de la teneur en air pour 70% de remplacement granulaire. Selon eux cela est dû à la forme irrégulière des grains de verre ce qui une plus grande surface relative pour entrapper l'air.

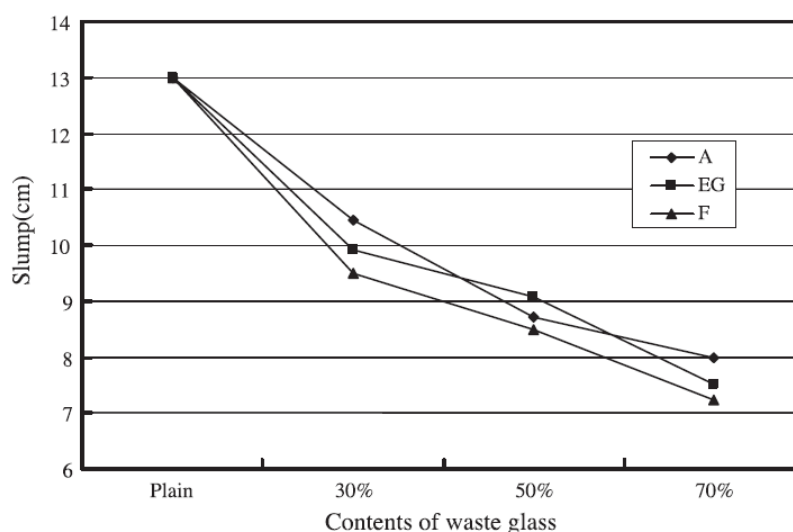


Figure 2-6 : Variation de l'affaissement en fonction du taux de remplacement granulaire (Ramlochan et al., 2000)

(Topçu et Canbaz, 2004) ont observé une faible diminution de l'affaissement qui s'explique par la géométrie irrégulière des particules de verre. Ces auteurs ont trouvé une diminution pouvant aller jusqu'à une perte de 27% de la teneur en air qu'ils expliquent par la surface lisse des granulats. De plus, la faible absorption du verre a permis d'augmenter la fluidité de mortier à la table vibrante. Cette faible absorption se traduit par une quantité supplémentaire d'eau dans la pâte, ce qui augmente la fluidité du béton.

2.5.2 Effet sur les propriétés à l'état durci

L'optimisation du taux de remplacement mené par (Kateb, 2009) a permis d'observer que les plus le taux de remplacement est élevé, plus la résistance à la compression a tendance à diminuer. Cette diminution peut être importante par exemple à 100% de remplace des gros granulats et du sable, on note des résistances à la compression inférieure de 65% comparé au témoin ne contenant pas de verre. Cela est dû à la mauvaise adhérence entre la pâte cimentaire et les granulats de verre. Des fissures peuvent se créer plus facilement dans la zone de transition et se propager le long des granulats. Malgré cette diminution importante de la résistance à la compression, cet autre a retenu cette configuration granulaire pour la suite de ses essais et il réussit tout de même à avoir des résultats de résistance à la compression supérieure à ce que la norme CSA 165-04 catégorie 1 qui demande 20MPa pour des briques creuse.

Les études de (Ramlochan et al., 2000) ont été mené sur en remplacement des granulats fin et ils ont observé que la même tendance soit une diminution de la résistance plus le taux de remplacement augmente. Cette tendance se maintient dans le temps (Figure 2-7). cependant la réduction de la résistance n'est pas aussi importante que ce que les résultats de (Kateb, 2009) ont présenté. (Ramlochan et al., 2000) ont trouvé une diminution maximale de 13.4% par rapport au témoin pour leur mélange avec 70% de remplacement granulaire. Pour ces auteurs l'explication de cette performance viens aussi du manque d'adhérence entre les granulats et la pâte cimentaire. Les résultats pour la résistance à la flexion montrent des tendances similaires à celle de la résistance à la compression.

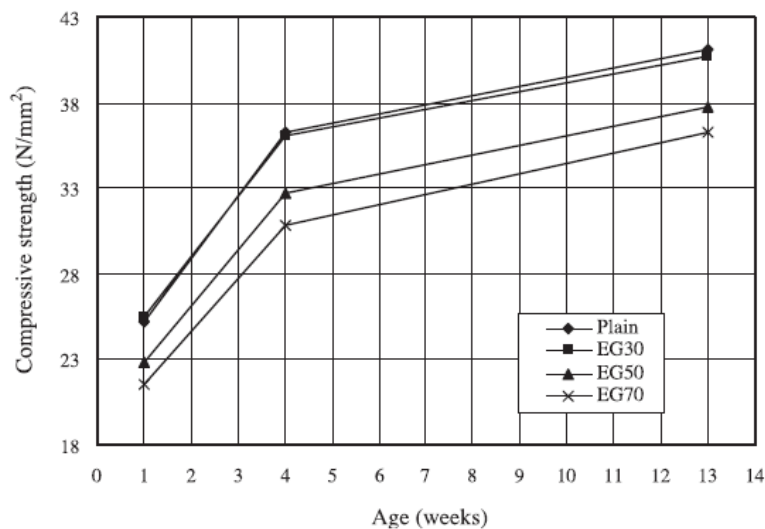


Figure 2-7 : Évolution des résistances à la compression pour des bétons contenant des agrégats de verre. (Ramlochan et al., 2000)

Les études de (Topçu et Canbaz, 2004) sont également concordant en ce qui a trait à la résistance à la compression. Ils ont remarqué une diminution de la résistance à la compression allant jusqu'à 49% pour un remplacement de 60% des granulats. Selon (Topçu et Canbaz, 2004), la grande fragilité des granulats entraîne la fissuration des granulats causant une mauvaise adhérence entre les granulats et la pâte de ciment. De plus dû à la géométrie irrégulière des particules de verre, les auteurs n'ont pas obtenu une distribution homogène des granulats.

(Ramlochan et al., 2000; Topçu et Canbaz, 2004) ont obtenu des tendances similaires pour la résistance à la traction. En effet ces auteurs ont déterminé que l'utilisation des granulats de

verre dans le béton va diminuer la résistance à la traction, soit une réduction de 15% pour 70% de GV pour (Park, Lee et Kim, 2004) et 37% pour 60% de GV pour (Topçu et Canbaz, 2004). Il a été observé que plus le taux de remplacement augmente, plus la résistance va être affectée. Selon (Ramlochan et al., 2000), ces résultats pourraient être dû la faiblesse de la zone de transition.

Les travaux de ces auteurs montrent que la résistance à la flexion est affectée de façon similaire à la résistance à la compression et la résistance à la flexion. À faible taux de remplacement (inférieur à 30%), ces auteurs ont observés une légère diminution (2-3%) de la résistance à la flexion alors qu'à taux de remplacement élevé (60-70%), l'effet des granulats de verre est plus important. (Ramlochan et al., 2000) a observé une réduction allant jusqu'à 18% pour un taux de remplacement granulaire de 70%.

2.5.3 Aspect architectural

L'ajout de granulats de verre augmente beaucoup la valeur architecturale des éléments coulés. La Figure 2-8 montre différentes plaques architecturales réalisées par (Kateb, 2009), lors de ses travaux d'optimisation.



a : témoin, 0%PV 20 % SV



b : 30%PV, 50%SV, 75%G



c : 8%MK, 30%PV, 100 % SV, 75%GV

Figure 2-8 : Plaques architecturales (Kateb, 2009)

Où :

PV = Poudre de verre

SV = Sable de verre

GV = Granulats de verre

MK = Métakaolin

Cette figure montre que plus le taux de remplacement des granulats est élevé, plus la valeur architecturale sera grande. Il a été démontré que les granulats naturels donnent une teinte plus grisâtre au béton, diminuant ainsi sa valeur architecturale, alors que le verre

conserve une teinte plus blanchâtre au béton ce qui donne un aspect visuel plus intéressant et fait ressortir les granulats de verre (Kateb, 2009).

2.6 Réaction alcalis-silice

2.6.1 Définition et mécanismes

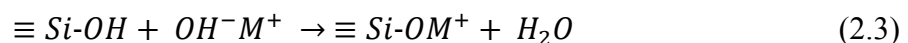
La réaction alcalis granulat RAG est une réaction chimique se produisant dans le béton. Trois type de réaction sont regroupé sous le terme réaction alcalis granulat, il y a la réaction alcalis carbonate, réaction alcalis-silice et la réaction alcalis-silicate, où la réaction alcalis silice est la plus fréquemment rencontrée (Idir, 2009). Cette réaction aussi nommé « le cancer de bétons » se produit lorsque trois conditions sont réunies.

- Présence de granulat potentiellement réactif
- Humidité relative supérieure à 80-85%
- Concentration en alcalin au-dessus d'un seuil critique.

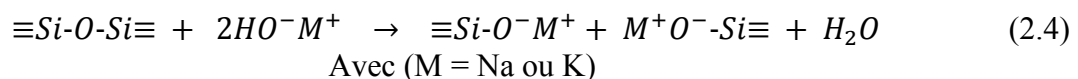
L'élimination d'un de ce paramètre peut éliminer cette réaction. En général, le paramètre le plus facile à influencer est les granulats. Cependant dans certains cas, il n'est pas possible de modifier les granulats. Il faut donc travailler sur le contrôle de l'humidité ou des alcalis dans la matrice cimentaire.

Selon (Diamond, 1989), la présence de RAG dans le béton se trouve par un faïençage ou l'éclatement du béton. En général il faut plusieurs dizaines d'années pour que les effets de cette réaction apparaissent.

(Poole, 1992) décrit la RAG comme une réaction lente où les minéraux composant les bétons peuvent présenter différentes formes de silice réactive. Cette dernière commence par les groupes silanols (Si-OH), réagissant avec les hydroxydes alcalins de la solution interstitielle.



Ensuite se produit l'attaque sur les ponts siloxane (Si-O-Si), situés plus profondément.



L'évolution de la réaction peut être décrite de la façon suivante (Poole, 1992) (Figure 2-9) :

- Concentration des alcalins dans la solution interstitielle lors de la progression de l'hydratation.
- Migration des ions OH^- , Na^+ et K^+ de la solution interstitielle vers la silice réactive des granulats.
- Réaction des hydroxydes alcalins avec l'acide silicique réactif.
- Formation d'un gel de silice alcalin susceptible de gonfler.
- Dans quelques cas, transformation du gel en silicate de calcium hydrate alcalin non gonflant, qui, sous forme de membrane ou couche semi-perméable sur la surface, laisse passer de préférence les ions Na^+ et K^+ ainsi que l'eau.
- Formation à l'intérieur des granulats de gel de silice alcalin susceptible de gonfler.
- Poursuite de la réaction et absorption d'eau augmentant la pression intérieure.
- Fissuration et écoulement du gel lorsque la pression intérieure est supérieure à la résistance à la traction des granulats et de la pâte de ciment durcie.

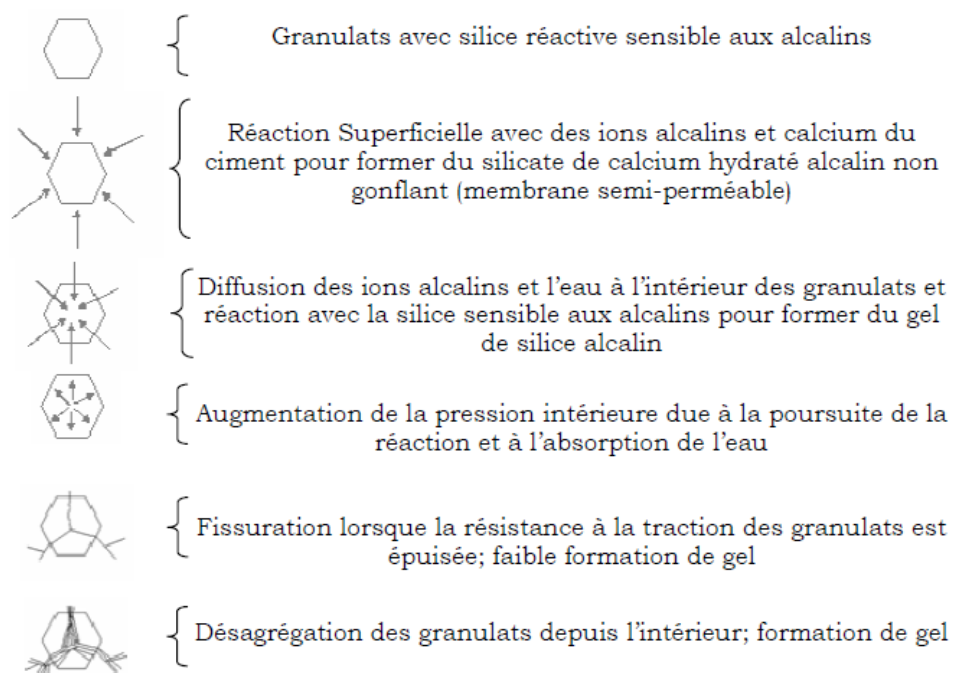


Figure 2-9 : Représentation schématique d'un mécanisme possible entraînant des dégâts lors de la réaction alcali-silice (Sprung et Sylla, 1998)

2.6.2 Les granulats de verre et la RAS

L'influence de la taille des particules de verre sur l'expansion due à la RAS fait état de nombreuses discussions dans la littérature. En effet pour (Meyer et Xi, 1999), les bétons contenant des particules de diamètre supérieur à 150 μm sont susceptibles à la RAS. Pour (Idir, 2009), cette limite se trouve à 1,25 mm. En effet, ses travaux lui ont permis de déterminer que pour des particules inférieures à 1,25 mm il n'y a pas de gonflement significatif. Elle a cependant noté des signes extérieurs de la RAS soit des exsudations. Pour d'autres auteurs, il y aurait une taille de granulat où l'expansion est maximale. Cette dimension est appelée « pessimum ». (Jin, Meyer et Baxter, 2000), présente cet effet pessimum comme étant la taille de la particule de verre où les réactions de formation et de diffusion de gel est à l'équilibre. Ces réactions sont les processus physiques influençant les pressions internes du béton. La formation de gel contribue à l'augmentation des pressions internes tandis que la diffusion du gel réduit ces pressions. La taille pessimum est donc la taille où ces réactions sont à l'équilibre (Jin et al., 2000).

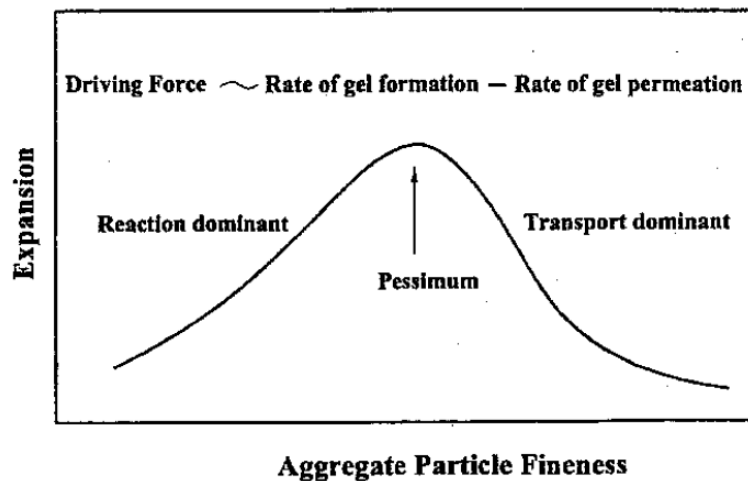


Figure 2-10 : Illustration de l'effet pessimum comme étant le résultats de deux processus (Jin et al., 2000)

En ce qui a trait à la taille pessimum, (Jin et al., 2000) ont déterminé que les particules de taille de 1,18 mm entraînent la plus forte expansion. (Xie, Xiang et Xi, 2003) ont déterminé que le pessimum est de 2,36 mm alors que pour (Yamada et Ishiyama, 2005) ont remarqué que la taille des particules de verre ayant la plus forte expansion se situe dans la plage de 0,25-0,6 mm.

Lorsqu'on regarde les granulats de verre dans une optique d'utilisation dans un béton architectural, l'utilisation de fines particules de verre nuit à l'effet architectural du verre. On peut donc dire que les gros granulats de verre (5-10mm) se situent dans la zone sensible à la RAS. Il est donc nécessaire de contrôler un des autres paramètres de la RAS.

2.6.3 Effets des ajouts cimentaires

Lorsque l'on se retrouve en présence de granulats susceptible de développer la RAS, l'utilisation d'ajouts cimentaires s'avère une alternative intéressante car en plus d'améliorer les performances mécaniques certains de ces ajouts cimentaires permettent aussi de réduire l'expansion causée par la RAS.

(Chappex et Scrivener, 2013) a mené des études afin de mieux comprendre les mécanismes de cette réaction ainsi que les mécanismes de mitigation lorsque des ajouts cimentaires sont utilisés. Selon ces auteurs la formation des gels de RAS est directement du taux de dissolution de la silice réactive. Les auteurs se sont penchés sur les méthodes pour ralentir le taux de dissolution et ont trouvé que les aluminates ont une grande influence sur ce taux. Ils ont remarqué que les aluminates en solution vont s'intégrer à la surface de la silice réactive et ce même dans des environnements alcalins comme le béton. Cette intégration diminue le taux de dissolution de la silice, ce qui diminue la formation de gel de silice. (Chappex et Scrivener, 2013) ont également remarqué que cette réaction peut avoir deux effets dans les bétons, le premier a un effet sur les C-S-H et diminue le pH de la solution interstitielle ce qui diminue la dissolution des phases réactives des granulats. Le second est que les aluminates réactifs vont s'absorber à la surface de la silice réactive et diminue également sa vitesse de dissolution. Les auteurs mentionnent une synergie entre ces deux effets ou la diminution du pH de la solution interstitielle augmenterait le taux d'absorption des aluminates.

Les ajouts cimentaires riches en aluminates comme les cendres volantes, le laitier de haut fourneau et le métakaolin peuvent avoir un effet sur l'expansion causée par la RAS. cet effet peut même est plus efficace que des ajouts de silice pure tel la fumée de silice (Chappex et Scrivener, 2012a). Un des mécanismes de mitigation serait la fixation des alcalis de la solution interstitielle. Cependant (Chappex et Scrivener, 2012a), ont remarqué que bien que les ajouts cimentaire contenant des aluminates se sont montré plus efficace pour contrôler

l'expansion due à la RAS, ce n'est pas dû au phénomène de la fixation des alcalis. L'effet de la fixation n'est pas le mécanisme dominant. En effet, les auteurs ont remarqué que le contenu en aluminates des C-S-H est plus élevé dans un système avec du métakaolin plutôt que de la fumée de silice. Cependant, ils ont trouvé que la capacité de fixation des alcalis est similaire aux C-S-H dans un système avec de la fumée de silice. pour (Chappex et Scrivener, 2012a), un autre mécanisme intervient dans la mitigation de l'expansion causée par la RAS. Ce dernier serait que les aluminates dans la solution interstitielle préviennent la dissolution de la silice réactive des granulats. (Chappex et Scrivener, 2012b) ont testé cette hypothèse et a observé qu'une faible concentration (3,9 mM) d'aluminium dans la solution interstitielle a un effet important sur la dégradation des granulats par la formation de gel de RAS. Les auteurs ont également remarqué qu'il n'y avait pas beaucoup de différence dans l'endommagement des granulats pour des concentrations d'aluminium entre 3,9 et 35 mM. Cependant, dans les essais où il y avait un excès d'aluminium dans la solution interstitielle, (Chappex et Scrivener, 2012b) ont trouvé qu'il y a une forte réduction des dommages aux agrégats. Ils expliquent ceci par le fait que les aluminates sont consommés et qu'ils sortent de la solution interstitielle. Dans les solutions à faible concentration, les aluminates sont consommés rapidement à moins d'avoir une source solide pour fournir de nouveaux aluminates.

2.6.3.1 Cendres volantes

Les travaux de (Duchesne et Bérubé, 1994), ont montré que des cendres volantes à très haute teneur en alcalis permet de réduire l'expansion jusqu'à 60% pour des granulats Spratt (avec un remplacement cimentaire de 40%). Cependant, selon leur études cette réduction n'est pas assez importante pour entrer dans les critères de la norme. Par contre les cendres volantes ayant une teneur en alcalis plus faible ont développé des expansions conformes à la norme avec un taux de remplacement de 20%, donc une réduction plus importante de l'expansion

(Hanna, Morcous et Tadros, 2014), ont testés des cendres volantes classe F et classe C. les résultats obtenus ont montré que les mélanges contenant des cendres volantes classe F en systèmes binaire, ternaire et quaternaire ont développé des expansions plus faibles que ce que demande la norme ASTM C1567. De plus, ces travaux montrent que les cendres volantes classe F permettent développer une expansion plus faible que les cendres volantes classe C (Figure 2-11). Ce s'explique selon les auteurs, par le fait que les cendres volantes de classe F en plus de densifier et imperméabiliser la matrice cimentaire crée des C-S-H ayant un faible ratio calcium/silice. Les C-S-H de cette nature peuvent fixer les alcalis.

Mix ID	Description ^a	ASTM C1567 28-day expansion (%)
N/A	% Cement replacement (% coarse aggregate)	Limit = 0.1%
1A	40C-30LS	0.12
1B	40C-45LS	0.10
1C	45C-30LS	0.10
1D	45C-45LS	0.10
^b 2	20C-20F-30LS	0.05
2B	20C-15F-45LS	0.07
2C	15C-15F-45LS	0.09
^b 2D	15C-21F-30LS	0.04
^b 2E	15C-21F-45LS	0.04
^b 2F	15C-18F-15S-30LS	0.04
3	20C-30S-30LS	0.12
3B	20C-30S-45LS	0.12
4A	35C-30LS	0.18
4B	35C-45LS	0.12
5	Ref. Mix-17 C-30LS	0.28
^b 6	Ref. Mix-25F-30LS	0.04

^aC, Class C fly ash; F, Class F fly ash; S, ground granulated blast furnace slag; LS, limestone.

^bMix chosen to test for overall performance and in-field applications.

Figure 2-11 :Description des mélanges et résultats d'expansion due à la RAS (Hanna et al., 2014)

(Shafaatian, Akhavan, Maraghechi et Rajabipour, 2013) ont mené une étude sur les différents mécanismes de contrôle de la RAS dans des mortiers contenant des cendres volantes. Ces auteurs ont observé que les cendres volantes réduisent la diffusion des alcalis dans le mortier. Les alcalis ont donc plus de difficulté à pénétrer le béton ce qui réduit la vitesse de la réaction. (Shafaatian et al., 2013) ont observés tout comme (Hanna et al., 2014) que les cendre volante réduisent le ratio Ca/Si des C-S-H permettant une plus grande fixation des alcalis.

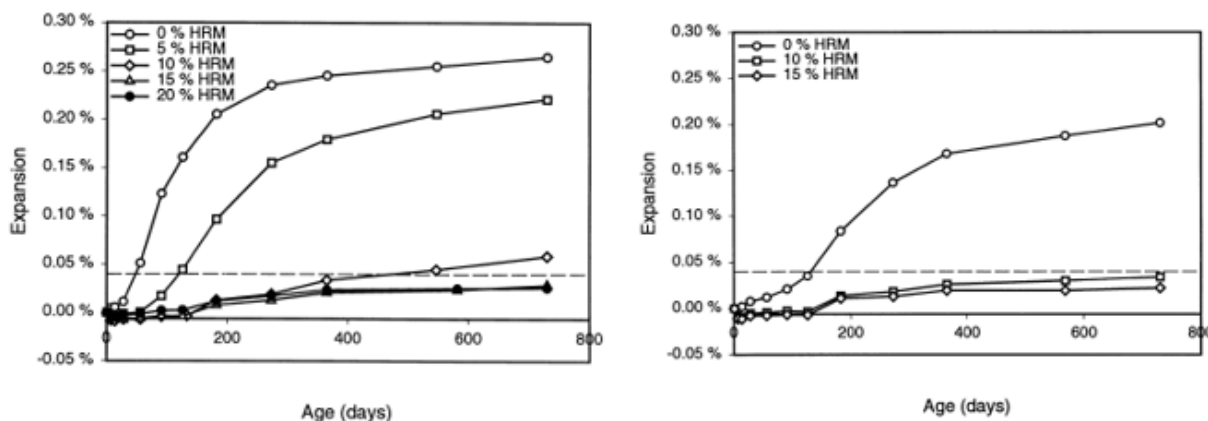
Par contre, (Shafaatian et al., 2013) mentionne que la diffusion des alcalis a un effet plus important que la fixation. Donc une matrice plus dense est plus efficace pour contrôler l'expansion dans les mortiers que la capacité à fixer les alcalis. Cet ajout cimentaire a également un effet sur les résistances à la traction. En effet, les auteurs ont observé une plus grande résistance à la traction des mortiers avec ajouts cimentaire. Il est donc plus difficile d'initier la fissuration et créer des chemins préférentiels pour la pénétration des alcalis dans le mortier.

(Chappex et Scrivener, 2012b) a fait des observations similaires aux auteurs précédent, mentionnant entre autres que les ajouts cimentaires en plus de diminuer le ratio Ca/Si , les aluminates qui se trouve dans la solution interstitielle, vont pouvoir aller s'absorber sur la silice réactive des granulats et diminuer sa dissolution.

2.6.3.2 Métakaolin

(Ramlochan et al., 2000), ont mené une étude sur l'effet du métakaolin sur l'expansion due à la RAS dans les bétons. La Figure 2-12 présente les résultats des essais d'expansion sur prismes de béton. La partie « a » présente les résultats des essais réalisés avec le granulat Spratt et la partie « b » montre les résultats des essais faits avec le granulat Greywacke. Les auteurs ont remarqué que qu'initialement tous les bétons contenant du métakaolin ont montré du retrait plutôt qu'une expansion. Cela est attribué au retrais endogène. Ils ont également observé que pour les granulats Spratt, 5% de métakaolin retarde un peu la réaction, mais lorsque l'expansion comment la réaction est rapide. Cependant, les auteurs présents qu'à un taux de remplacement de 10% ou plus, on observe une diminution importante de l'expansion due à la RAS pour les deux types de granulats étudiés. Ils ont également observé que pour les granulats Spratt, le mélange avec 10% de métakaolin a un comportement similaire aux mélanges avec 15 et 20% de métakaolin jusqu'à l'âge de 18 mois. Il y a ensuite une expansion plus marquée de ce mélange. Les auteurs expliquent ce phénomène par une solution interstitielle plus alcaline avec le temps. Ces derniers ont également fait l'observation que l'expansion est plus élevée pour les prismes de granulats Spratt, indiquant que la quantité de remplacement cimentaire nécessaire pour contrôler l'expansion est aussi dépendante du type de granulats réactif présent. Pour (Ramlochan et al., 2000), le mécanisme d'action du

métakaolin pour réduire l'expansion due à la RAS est la fixation des alcalis dans les C-S-H, ce qui diminue l'alcalinité de la solution interstitielle.



(a) granulats Spratt (b) granulat Greywacke
Figure 2-12 : Expansion sur prismes de béton contenant du métakaolin (Ramlochan et al., 2000)

(Taha et Nounu, 2009) ont obtenu une diminution importante de l'expansion due à la RAS avec l'utilisation du métakaolin pour réduire l'expansion due à la RAS, même avec l'utilisation de sable de verre.

2.6.3.3 Fumée de silice

Les résultats présentés par (Duchesne et Bérubé, 1994), ont montré que les fumées de peuvent avoir un effet retardateur plutôt que mitigeur de l'expansion. De plus, le type d'agrégat peut influencer l'efficacité de cet ajout cimentaire. En effet, les auteurs ont remarqué que pour des essais avec le tuff rhyolitique, l'expansion développée est plus grande que le témoin, mais ce phénomène ne s'est pas produit pour avec le granulat calcaire.

(Boddy, Hooton et Thomas, 2003) ont mené des études sur deux types de fumée de silice, une ayant un faible dosage de SiO_2 (68,21%), plus faible que ce que le taux normal spécifié de 85% minimum et une fumée de silice avec une teneur en SiO_2 supérieure à cette limite soit 88,40%. La Figure 2-13 montre l'effet de ces fumées de silice sur l'expansion due à la RAS dans des mortiers. Les auteurs ont observé que plus le taux de remplacement augmente, plus l'expansion diminue. Ils ont également remarqué que la fumée de silice à faible taux de SiO_2 (LS) a moins d'effet sur l'expansion due à la RAS. De plus, seul le mélange avec un remplacement de 12% de fumée de silice à 88,40% de SiO_2 (NS) a développé une expansion inférieure à la limite permise par la norme.

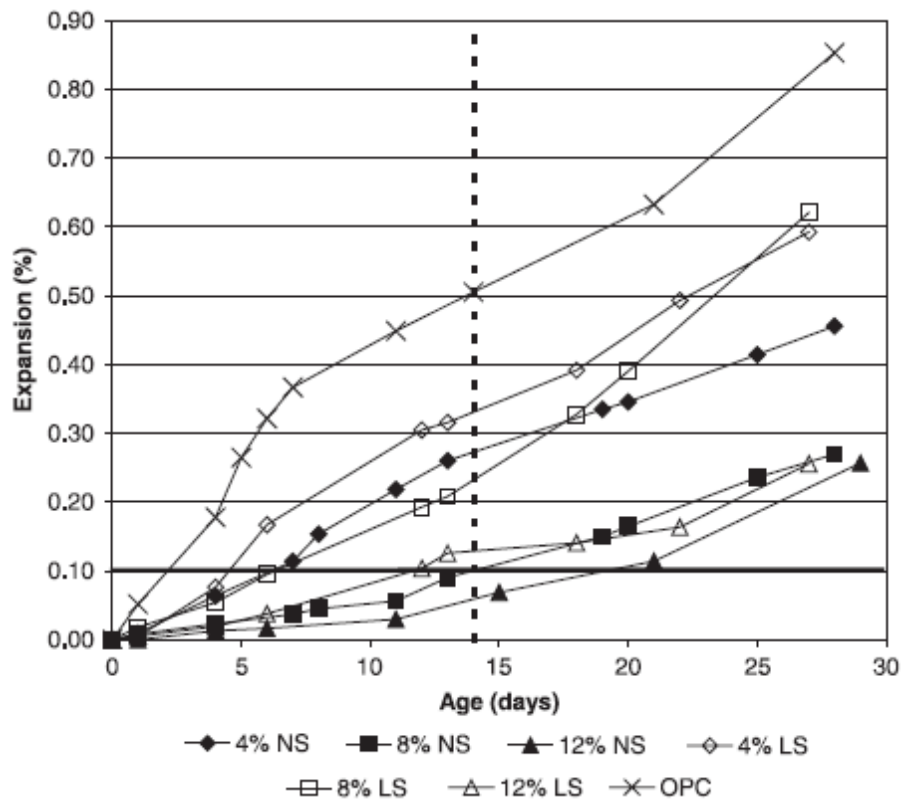


Figure 2-13 : Effet de la quantité de SiO_2 de la fumée de silice dans l'essai d'expansion accélérée sur mortier à différent niveaux de remplacement. (Boddy et al., 2003)

2.6.3.4 Laitier de haut fourneau

Les travaux de (Hanna et al., 2014) montrent que le laitier est moins efficace pour réduire l'expansion par rapport aux cendres volantes de classe F. (Duchesne et Bérubé, 1994) ont fait des observations similaires, où ils ont noté que 20% de cendres volantes classe F permettent d'obtenir des expansions inférieures à la limite permise de 0,04% tandis qu'il faut au moins 35% de laitier pour obtenir des résultats similaires. (Taha et Nounu, 2009) ont fait des observations similaires, où ils ont utilisé 60% de laitier et ont obtenu de très faibles expansions. (Kandasamy et Shehata, 2014) ont mené une étude intéressante sur les mélanges cimentaire ternaires contenant des cendre volantes et du laitier. Leurs résultats portant sur la mitigation de l'expansion causée par la RAS ont présenté à la Figure 2-14. Les résultats sont également concordant, les mélanges contenant une plus grande quantité de cendre volante développe toujours moins d'expansions que l'équivalent en laitier, et ce à différent taux de remplacement cimentaire.

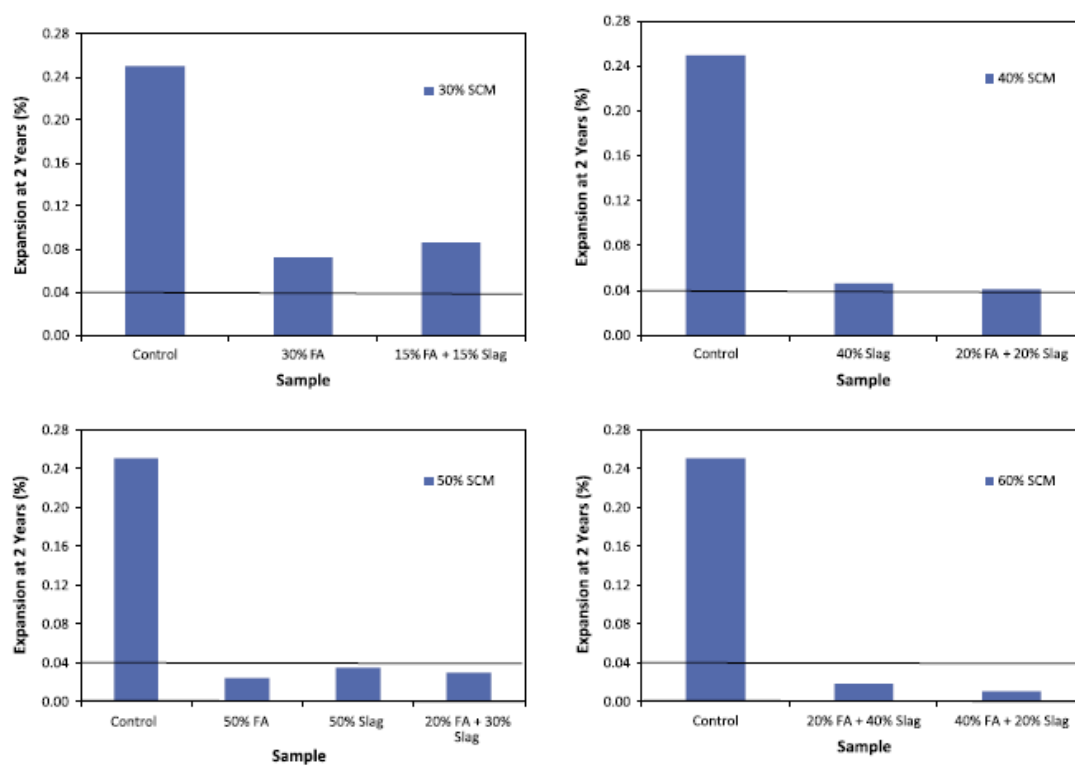


Figure 2-14 : Expansion de prismes de bétons après deux ans d'exposition à différent taux de remplacement cimentaires (Kandasamy et Shehata, 2014)

CHAPITRE 3 PROGRAMME EXPÉRIMENTAL ET PROCÉDURES D'ESSAIS

3.1 Description des matériaux

3.1.1 Granulats

3.1.1.1 Granulats calcaires

Les gros granulats utilisés proviennent des Carrières Saint-Dominique à St-Dominique. Ce sont des granulats concassés à partir d'une roche calcaire métamorphique. Sa densité à l'état saturé et sec en surface (SSS) est de 2,76. Son absorption est de 0,485 %. Le diamètre nominal maximal des gros granulats est de 20 mm.

3.1.1.2 Granulats de verre.

Le verre pour la fabrication des granulats de verre provient de bouteilles d'alcool fournies généreusement par la SAQ et la Maison de Futailles. Une fois ces bouteilles reçues à l'université, elles ont été nettoyées, l'étiquette a été enlevée et cette étape s'est terminée par un rinçage. Ensuite, ces dernières sont séchées à l'air avant d'être concassées dans un broyeur à mâchoires (Figure 3-1). Le diamètre maximal des granulats est de 20 mm. Les granulats de verre ont été utilisés en remplacement de la fraction 5-20 mm des granulats calcaires dans les bétons.

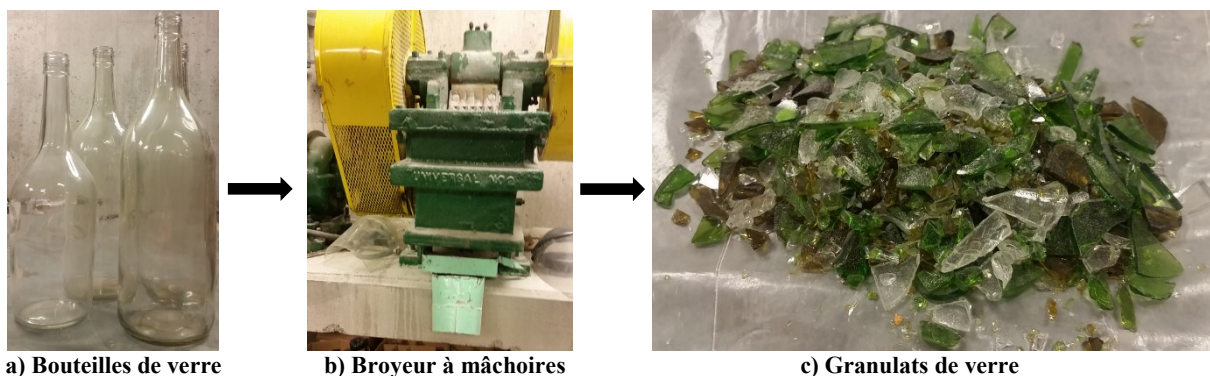


Figure 3-1 : Production des granulats de verre

3.1.2 Sable

3.1.2.1 Sable à béton

Le sable utilisé est un sable naturel fourni par la carrière DJL. Il s'agit d'un sable siliceux de densité à l'état saturé et superficiellement sec (SSS) de 2,66, avec un coefficient d'absorption d'environ 0,895 % et un module de finesse de 2,59.

3.1.2.1 Sable de verre

Le sable de verre provient du rejet de tamisage des granulats de verre utilisés pour ce projet. Le sable de verre a une dimension entre 0 et 5 mm et est utilisé dans des mortiers et des bétons architecturaux.

3.1.3 Ciments

Quatre types de ciments ont été utilisés pour ce projet soit un ciment de type GU, GU pâle, GU à faible teneur en alcalis et un ciment blanc. Le ciment de type GU est un ciment à usage général et est utilisé régulièrement dans les essais en laboratoire. Le GU pâle est similaire au GU classique, mais son procédé de fabrication est légèrement modifié afin de lui donner une couleur un peu plus pâle que son homologue, le GU conventionnel de base. Ces deux types de ciments proviennent de la compagnie Holcim. Le GU à faible teneur en alcalis a, comme son nom l'indique, une faible teneur en alcalis soit inférieure à la valeur exigée par la norme ASTM C 150 qui recommande une quantité en alcalis maximale de 0,60 %. Ce dernier est produit par Colacem. Le ciment blanc quant à lui est fabriqué par Fédéral White Cement. Ces ciments ont été choisis soit pour leur couleur pale afin d'avoir le meilleur impact architectural ou pour leur faible teneur en alcalis ce qui peut aider à contrôler l'expansion causée par la RAG.

3.1.4 Poudre de verre

La poudre de verre est un ajout cimentaire obtenu par broyage du verre mixte (verre de différentes couleurs). Ce verre mixte est un verre de rebus récupéré à travers divers systèmes de tri au Québec. Le verre est un matériau ou un alliage dur, fragile et transparent à la lumière visible. Il est constitué le plus souvent d'oxyde de silicium (silice SiO_2 , le constituant principal du sable) et de fondants. Parmi tous les types de verre, le plus courant est le verre

sodocalcique. Du point de vue physique, le verre est un matériau amorphe (c'est-à-dire non cristallin) présentant le phénomène de transition vitreuse. La poudre de verre utilisée dans ce projet a été broyée industriellement en grande quantité.

3.1.5 Poudre de verre de source électronique

Ce type de verre provient des résidus de l'industrie de l'électronique. Il s'agit d'une source de verre différente que celle du verre sodocalcique des bouteilles. Le plomb qui existe dans ces verres électroniques a au préalable été retiré dans le procédé de triage de l'usine.

Le verre est broyé dans un broyeur à boulets (Figure 3-2) pour une durée de 6 fois 25 minutes avec un repos de 45 minutes entre chaque séance de broyage. Cette technique est inspirée des travaux de maîtrise de Ablam Zidol (Zidol, 2009).



Figure 3-2 : Broyeur à boulets

3.1.6 Cendres volantes classe F

La Cendre volante utilisée pour cette étude est une cendre volante classe F. Les cendres volantes sont des résidus résultant de la combustion du charbon pulvérisé et évacué de la chambre de combustion d'un four par les gaz qui s'en échappent. En d'autres termes, elles sont produites dans les centrales thermiques utilisant du charbon pulvérisé. Elles se présentent sous forme d'une poudre de couleur plus ou moins foncée suivant sa teneur en carbone et en impuretés (El Gattioui, 1998). Les cendres volantes sont constituées de particules sphériques

vitreuses, pleines ou creuses. La norme ASTM C618 — 80 regroupe les cendres volantes en deux grandes classes suivant leur composition chimique :

- La classe F riche en oxyde ($\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3 > 70 \%$) avec une teneur faible en chaux ($\text{CaO} < 10 \%$). Elle est qualifiée de silico-alumineuse ;
- La classe C riche en chaux ($\text{CaO} > 10 \%$) avec une teneur en oxyde ($\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3 > 50 \%$). Elle est qualifiée de silico-calcaire.

Elles sont fréquemment utilisées dans le béton. Leur incorporation dans le béton peut réduire le besoin en eau d'environ 5 à 15 % par rapport au ciment Portland. Cette réduction en eau est souvent attribuée à la forme sphérique des particules des cendres volantes et aussi à l'adsorption des fines particules de cendres volantes sur les grains de ciment qui favorise leur défloculation. Leur hydratation est lente et nécessite souvent un prolongement de la durée de mûrissement humide pour favoriser le développement de leurs performances.

3.1.7 Métakaolin

Le métakaolin est un produit issu d'une argile d'origine granitique, la kaolinite, qui est transformée par calcination, procédé qui désorganise la structure cristalline et la rend réactive (Cyr et al, 2010). Il est donc produit à partir de kaolin de grande pureté calciné à une température d'environ 700 °C. Le produit est broyé jusqu'à une taille d'environ 1 à 2 μm . Le métakaolin a des propriétés pouzzolaniques : il réagit en présence de chaux et d'eau et devient un liant au même titre que le ciment. L'apport en chaux peut être assuré soit par adjonction directe, soit en utilisant le résidu de la réaction hydraulique du ciment. Le métakaolin peut donc être utilisé en substitution partielle dans une formulation classique à base de ciment : il complète la prise hydraulique en remplissant les vides du ciment durci ce qui contribue à diminuer la porosité finale (Robit et al, 2012). La réaction hydraulique standard est complétée en présence d'un ajout cimentaire comme le métakaolin par une réaction pouzzolanique comme présenté à la section 2.2.1.

3.1.8 Adjuvants chimiques

Les adjuvants chimiques utilisés dans ce projet sont l'EUCON DX à base d'acides hydroxycarboxyliques, et l'AIREX-L, un agent entraîneur d'air, qui est un composé de sels sulfonés d'hydrocarbures sans chlorure. L'agent entraîneur d'air est utilisé pour entraîner un

réseau de bulles d'air uniformément réparti dans la matrice cimentaire et améliorer la résistance au gel des bétons.

3.2 Caractéristiques des matériaux cimentaires

3.2.1 Caractéristiques physiques

Les matériaux cimentaires utilisés ont été choisis de façon à avoir le moins d'impact sur la valeur architecturale du béton produit, c'est à dire une matrice cimentaire pâle accentuant l'effet d'un taux élevé en granulats de verre comme l'ont montré les travaux de Kateb. Les propriétés physiques de ces matériaux sont présentées au Tableau 3-1 et sur la Figure 3-3.

Tableau 3-1 : Caractéristiques physiques des matériaux cimentaires utilisés
Matériaux

Caractéristiques	Ciment GU	Ciment GU faible teneur en Alcalis	Ciment blanc	Ciment GU pâle	Poudre de verre	Poudre de verre électronique	Cendres volantes	Métakaolin
Densité	3,15	3,15	3,01	3,15	2,68	2,68	2,36	2,51
Finesse Blaine (m²/kg)	382	354	395	382	440	389	450	2140
Diamètre moyen (µm)	14,9	19,9	18,7	14,9	10,9	12,0	9,2	3,3

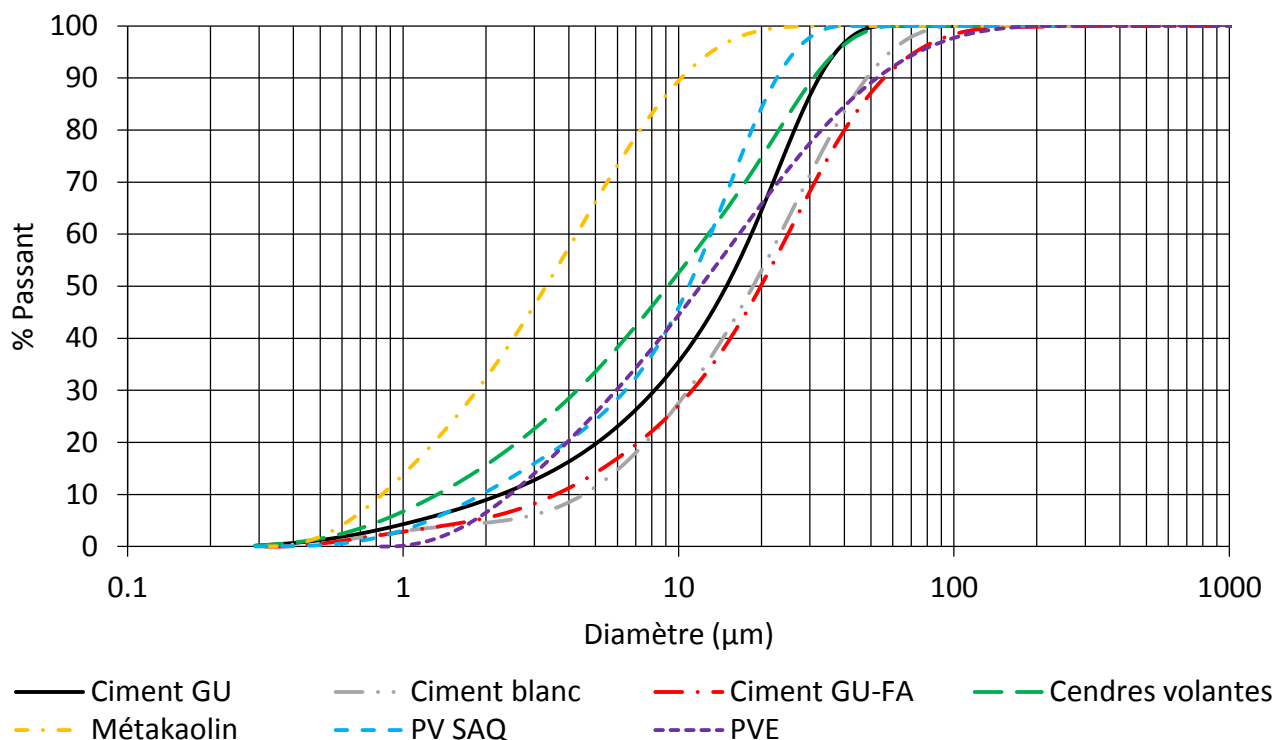


Figure 3-3 : Courbe granulométrique des matériaux cimentaires utilisés

Comme le montre le Tableau 3-1, les ajouts cimentaires ont une densité plus faible que les ciments étudiés. La finesse des ciments varie entre 350 et 400 m^2/kg alors que les ajouts cimentaires ont une finesse variant entre 380 et 2140 m^2/kg . Cela s'explique par la finesse très élevée du métakaolin qui est un produit d'argile calcinée. Les cendres volantes et la poudre de verre ont une finesse similaire se situant autour de 445 m^2/kg alors que la poudre de verre électronique a une finesse plus faible probablement due à la méthode plus artisanale de fabrication. Cependant la finesse de la PVE (389 m^2/kg) est similaire à celle de la PV (374 m^2/kg) produite par la même méthode de fabrication utilisée dans les travaux de (Zidol, 2009). Comme le montre la valeur du diamètre moyen et les courbes granulométriques, les ciments sont en général plus grossiers que les ajouts cimentaires. Cependant, il faut noter que le diamètre moyen des particules des matériaux est compris entre 9.2 et 19.9 μm à l'exception du métakaolin qui est beaucoup plus fin que tous les autres matériaux. Cela indique que le métakaolin est très réactif et que cela va aider au développement des résistances à jeune âge. Ce matériau peut très bien être utilisé en système ternaire afin de bonifier les effets de l'ajout cimentaire principal.

3.2.2 Caractéristiques chimiques

Le Tableau 3-2 présente les propriétés chimiques des matériaux cimentaires utilisés pour le projet. Les principaux éléments que l'on retrouve dans les matériaux cimentaires y sont présentés.

Tableau 3-2 : Composition chimique des matériaux cimentaires utilisés dans le projet
Éléments

Matériaux	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O	PAF	Na ₂ Oeq
PV	70,143	2,011	0,319	11,286	0,814	0,125	0,52	13,714	0,38	14,06
PVE	60,747	2,086	0,099	1,375	0,092	0,059	6,949	8,021	-	12,59
GU	20,43	4,7	2,92	62,39	1,81	3,53	0,95	0,18	2,51	0,8
GU pâle	19,44	4,48	1,75	61,16	1,99	3,99	0,98	0,19	5,43	0,84
GUFA	19,78	4,39	3,06	63,96	1,74	3,07	0,61	0,17	2,47	0,57
CB	21,85	4,25	0,25	66,17	1,01	3,43	0,28	0,16	2,23	0,35
CV	49,92	27,61	12,28	3,71	0,93	0,3	1,82	0,35	1,9	1,54
MK	55,44	30,14	1,69	7,67	0,73	0,46	1,69	0,18	1,49	1,29

Les quatre types de ciments étudiés ont une teneur en CaO similaire se situant entre 61 et 67% et une quantité de SiO₂ près de 20%. La PV et la PVE ont une teneur élevée en SiO₂, mais pour ce qui est de leur teneur en métaux et en alcalis il y a de grandes variations, comme présenté au Tableau 3-2 la PV présente un taux de CaO de 11.3% lors que la PVE se situe à 1.4%. De plus, la PVE a un taux de 9.002% de SrO, 7.373% de BaO et 1.435% de PbO alors que la PV contient des traces négligeables de ces éléments soit 0.025% de SrO, 0.067% de BaO et 0.034% de PbO. Les CV et MK montrent également des particularités. En effet, ils ont une teneur en SiO₂ se situant entre les ciments et les PV et ils ont une grande quantité d'aluminates. Un des facteurs importants qu'il faut tenir compte lorsque des granulats de verre sont utilisés est la RAG/RAS. Un paramètre important des matériaux pouvant indiquer une potentielle réactivité est sa teneur en alcalis, un indicateur de la quantité possible d'alcalis pouvant entrer en solution et contribuer à la réaction. Les ciments GU et GU pâle ont une teneur en alcalis équivalents de 0,8% tandis que le ciment GU à faible teneur en alcalis et le ciment blanc ont une teneur de 0,57% et 0,35% respectivement. Cela laisse croire que les ciments blancs et à faible teneur en alcalis devraient avoir un meilleur comportement face à la

RAS. Les CV et le MK ont autour de 1,5% d'alcalis équivalents tandis que les PVs ont plus de 10%. Cette teneur élevée soulève régulièrement la question : est-ce que l'utilisation de la poudre de verre va engendrer la RAG/RAS puisqu'elle contient un taux élevé d'alcalis? Plusieurs études ont montré que ce n'est pas le cas. Bien que la PV et la PVE ont une teneur en $\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}}$ similaire, la PV a la quasi-totalité de ses alcalis sous forme de Na_2O alors que la PVE est plutôt divisée entre les Na_2O et K_2O .

3.3 Plan expérimental

3.3.1 Plan des essais réalisés

Le plan expérimental du projet est présenté à la Figure 3-4. Ce plan présente les différents essais réalisés pour chacune des phases de ce projet. La figure est séparée en deux, car les bétons réalisés pour le verre électronique contiennent des granulats calcaires et les bétons architecturaux contiennent des granulats de verre. Les détails des procédures d'essais réalisés sont présentés dans les sections suivantes de ce chapitre.

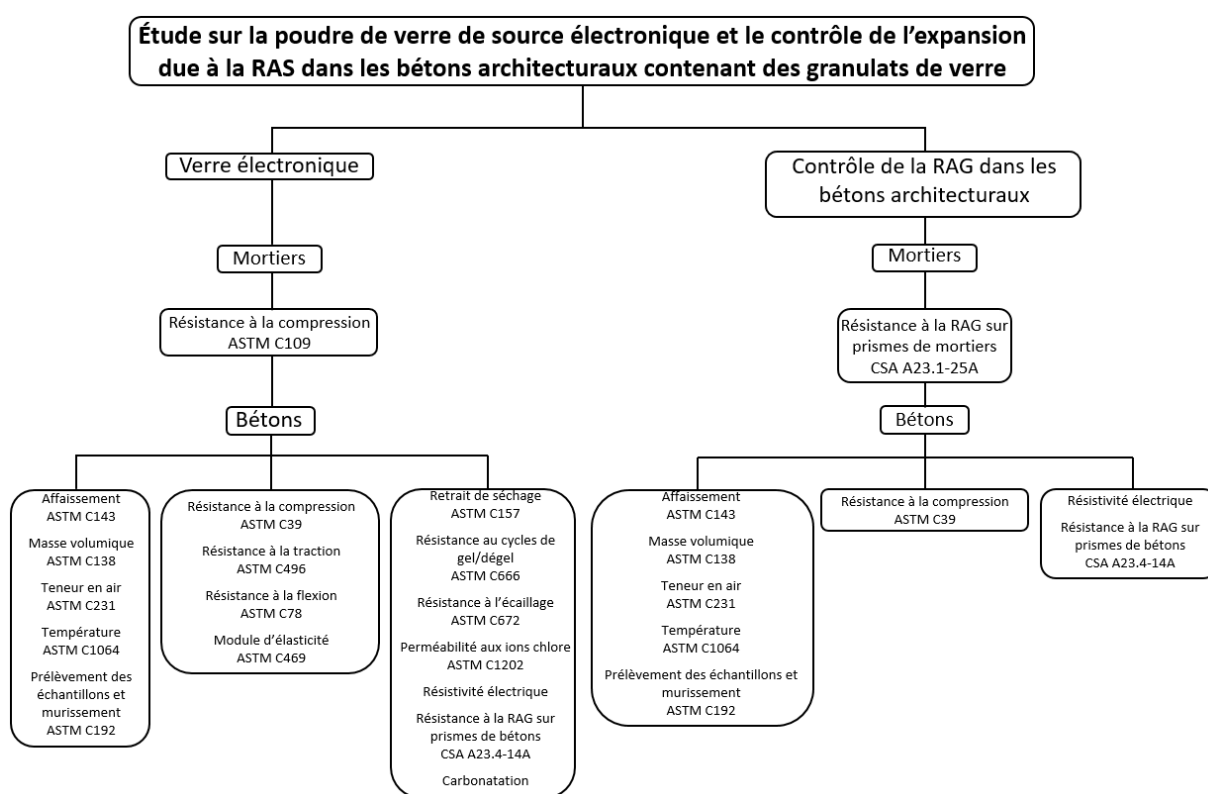


Figure 3-4 : Plan expérimental des essais réalisés

3.3.1 Descriptions des mélanges réalisés

Les trois prochains tableaux présentent les détails des mélanges réalisés dans le cadre de ce projet.

Le Tableau 3-3 présente les détails des mortiers et bétons réalisés pour la phase verre électronique du projet. Aucun granulat ou sable non standards n'ont été utilisés pour cette phase. Le deuxième tableau, le Tableau 3-4, montrent les mortiers réalisés dans la première partie de l'analyse sur les bétons architecturaux. Enfin, les bétons réalisés pour cette même phase se retrouvent au Tableau 3-5.

Tableau 3-3 : Description des mortiers et bétons incorporant de la poudre de verre électronique

	Nom du mélange	Matériaux (%)	
		Ciment GU	Poudre de verre électronique
Mortiers	Témoin	100	0
	10 % PVE	90	10
	20 % PVE	80	20
	30 % PVE	70	30
Bétons	Témoin	100	0
	20 % PVE	80	20
	30 % PVE	70	30

Le projet consiste en la caractérisation de la poudre de verre électronique sur des bétons avec un E/L de 0,50 et 0,40. L'échantillonnage sur les bétons d'E/L de 0,50 a été effectué sans problèmes, mais le projet a été arrêté avant que l'échantillonnage sur les bétons d'E/L de 0,40 soit réalisé. Un agent entraîneur d'air, et un réducteur d'eau sont utilisés dans ces bétons afin d'obtenir une maniabilité optimale et un réseau d'air bien développé.

Tableau 3-4 : Description des mortiers architecturaux
Matériaux (%)

Nom du mélange	Ciments				Ajouts cimentaires			Sables	
	GU	GU-P	GU-FA	Blanc	CV	MK	PV	Verre	Naturel
100GU	100	0	0	0	0	0	0	100	0
70GU 30CV	70	0	0	0	30	0	0	100	0
70GU 20 CV 10PV	70	0	0	0	20	0	10	100	0
89GU 11MK	89	0	0	0	0	11	0	100	0
65GU 30 CV 5MK	65	0	0	0	30	5	0	100	0
75GU 20 PV 5MK	75	0	0	0	0	5	20	100	0
100GU-P	0	100	0	0	0	0	0	100	0
100GU-FA	0	0	100	0	0	0	0	100	0
70GU-FA 30CV	0	0	70	0	30	0	0	100	0
70GU-FA 20CV 10 PV	0	0	70	0	20	0	10	100	0
89GU-FA 11MK	0	0	89	0	0	11	0	100	0
65GU-FA 30CV 5 MK	0	0	65	0	30	5	0	100	0
75GU-FA 20PV 5 MK	0	0	75	0	0	5	20	100	0
100CB	0	0	0	100	0	0	0	100	0
89 C 11MK	0	0	0	89	0	11	0	100	0
62CB 30 PV 8MK	0	0	0	62	0	8	30	100	0
100GU-FA 70GV	0	0	100	0	0	0	0	70	30
30 CV 70GV	0	0	70	0	30	0	0	70	30

Cette série de mortier a été réalisée en fonction de la norme CSA A23.2-25A, concernant l'expansion sur prismes de mortiers. Il y a une grande série de mélange, car le but est de voir l'effet de plusieurs combinaisons ciment-ajouts cimentaires et ainsi sélectionner des mélanges susceptibles de développer de bonnes résistances à la RAG.

Tableau 3-5 : Description des bétons architecturaux
Matériaux (%)

Nom du mélange		Ciments		Ajouts cimentaires		Sables		Granulats	
		GU	GU-FA	CV	MK	Verre	Béton	Verre	Béton
Série 1	Tém 100 GV-100SB	100	0	0	0	0	100	100	0
	30 CV 100GV-100SB	70	0	30	0	0	100	100	0
	30 CV 5MK 100GV-100SB	65	0	30	5	0	100	100	0
Série 2	Tém 100 GV-100SV	100	0	0	0	100	0	100	0
	30 CV 100GV-100SV	70	0	30	0	100	0	100	0
	30 CV 5MK 100GV-100SV	65	0	30	5	100	0	100	0
Série 3	Tém 70V-100SB	0	100	0	0	0	100	70	30
	30 CV 70GV-100SB	0	70	30	0	0	100	70	30

Les mélanges considérés pour cette série de bétons proviennent de ceux ayant présentés de meilleurs résultats dans les essais sur mortiers, ainsi que ceux présentant l'aspect architectural optimal étudié dans les travaux de Kateb (Kateb, 2009) pour le taux de remplacement granulaire. Enfin, les deux derniers mélanges sont inspirés des bétons que la SAQ utilise pour les planchers de certaines de leurs succursales.

Les bétons de la série 1 et 2 ont un rapport E/L de 0,45. Et la formulation a été réalisée en suivant la norme CSA A23.2-14A où il est mentionné une teneur en liant de 420 kg/m³, l'ajout de NaOH pour obtenir un taux en alcalis du ciment de 1,25 % et aucun autre adjuvant n'a été utilisé.

Comme les bétons de la série 3 sont inspirés de l'industrie, ces derniers ont une formulation différente. En effet, le rapport E/L est de 0,50 et la teneur en liant est de 350 kg/m³. De plus, un ciment de type GU à faible teneur en alcalis a été utilisé sans ajout de NaOH. Cela va permettre de voir l'impact des alcalis du verre sur les résultats obtenus. Un réducteur d'eau et un superplastifiant ont également été utilisés afin d'obtenir une meilleure maniabilité.

3.4 Essais sur mortiers

3.4.1 Résistance à la compression sur cubes de mortiers

L'essai de résistance à la compression a été réalisé conformément à la norme ASTM C109. Pour commencer, il faut sortir les échantillons de la chambre humide et les conserver sous un linge humide jusqu'au moment de l'essai. Avant de placer le cube dans la presse, il faut sécher la surface et s'assurer qu'il n'y a pas de saleté ou d'irrégularité sur les surfaces qui vont être en contact avec la presse. Ensuite, il faut placer l'échantillon dans la presse en s'assurant que ce sont deux surfaces planes qui vont être en contact avec la presse. La prochaine étape est de charger les cubes à un taux de chargement entre 900 et 1800 N/s. ce taux peut être ajusté pendant la première moitié de l'essai soit la moitié de la charge prévue.



Figure 3-5 : Essai de résistance à la compression sur prismes de mortier

3.4.2 Résistance à la réaction alcalis granulats sur prismes de mortiers

Les essais de la réaction alcalis-silice sont effectués sur les prismes de mortiers suivant la norme CSA A23.2-25A. L'essai consiste à déterminer les expansions des mortiers causées par la réaction alcalis-silice. L'objectif de cet essai est d'évaluer l'efficacité des ajouts cimentaire dans le contrôle de la réaction alcalis-silice. Les prismes sont de dimensions 25 x 25 x 285 mm. Les granulats utilisés sont des granulats fins de verre, divisés en fractions tel que demandé par la norme CSA A23.2-25A. Le dosage en liant est d'une part de liant pour 2,25 parts d'agrégats et le rapport E/L se situe à 0,50. Les prismes sont conservés dans un bac rempli d'une solution d'hydroxyde de sodium (NaOH) à concentration de 40,0 g par litre. Le

contenant est ensuite placé dans une étuve à $80\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ jusqu'aux échéanciers prévus par la norme. L'expansion des prismes est mesurée au moyen d'un comparateur (Figure 3-6).



Figure 3-6 : Comparateur pour la mesure de la RAG sur prismes de mortier

3.5 Essais de caractérisation

3.5.1 Granulométrie laser

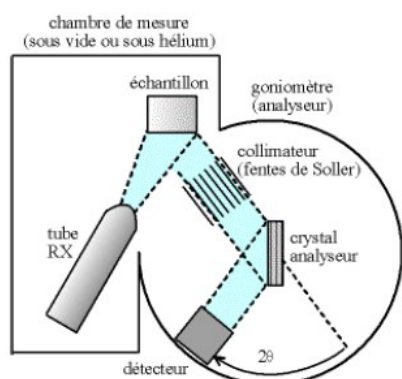
La granulométrie est l'étude de la répartition des particules selon leur taille. Pour des poudres fines, on peut utiliser un granulomètre au laser. La poudre est convoyée par de l'eau ou par l'air dans un faisceau laser. Le laser diffracte sur les particules et la largeur de la tache d'Airy permet de déterminer la taille des grains. C'est une technique basée sur la diffraction de la lumière. Lorsqu'un faisceau laser éclaire une particule, on peut observer des franges de diffraction. Selon Fraunhofer, l'intensité du rayonnement diffracté et l'angle de diffraction sont fonction de la taille des particules. Plus la particule est petite, plus l'angle de diffraction est grand.

3.5.2 Analyse chimique

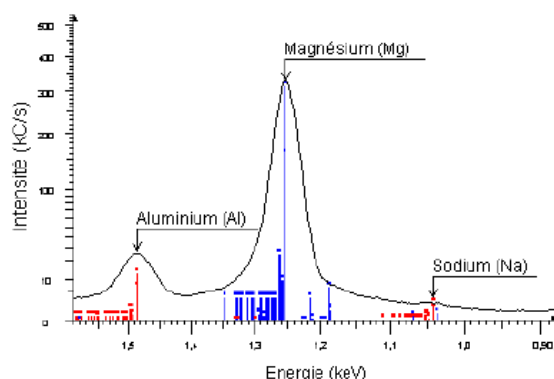
L'analyse chimique à l'aide de fluorescence X (XRF) a été utilisée pour déterminer les proportions respectives des principaux oxydes présents dans le ciment et les poudres de verre. La spectrométrie de fluorescence X (FX, ou XRF pour X-ray fluorescence) dont le principe de fonctionnement montré à la partie A de la Figure 3-7, est une technique permettant l'analyse

élémentaire, mais on ne sait pas sous quelle forme chimique. Cette technique utilise des phénomènes physiques qui ont été découverts et développés dans le domaine de la physique quantique (effet photoélectrique, émission spontanée, diffraction des rayons X). C'est une technique permettant de mesurer des échantillons très variés : minéraux, métaux, huiles, eau, ciments, polymères, verres...

Globalement, on place l'échantillon à analyser sous un faisceau de rayons X. Sous l'effet des rayons X, l'échantillon « entre en résonance » et réémet lui-même des rayons X qui lui sont propres : c'est la fluorescence. Si l'on regarde le spectre en énergie des rayons X fluorescents, exemple de la Figure 3-7 partie B, on voit des pics caractéristiques des éléments présents, on sait donc quels éléments on a, et la hauteur des pics permet de déterminer en quelle quantité.



a) Schéma du principe d'un appareil de fluorescence X dispersif en longueurs d'onde



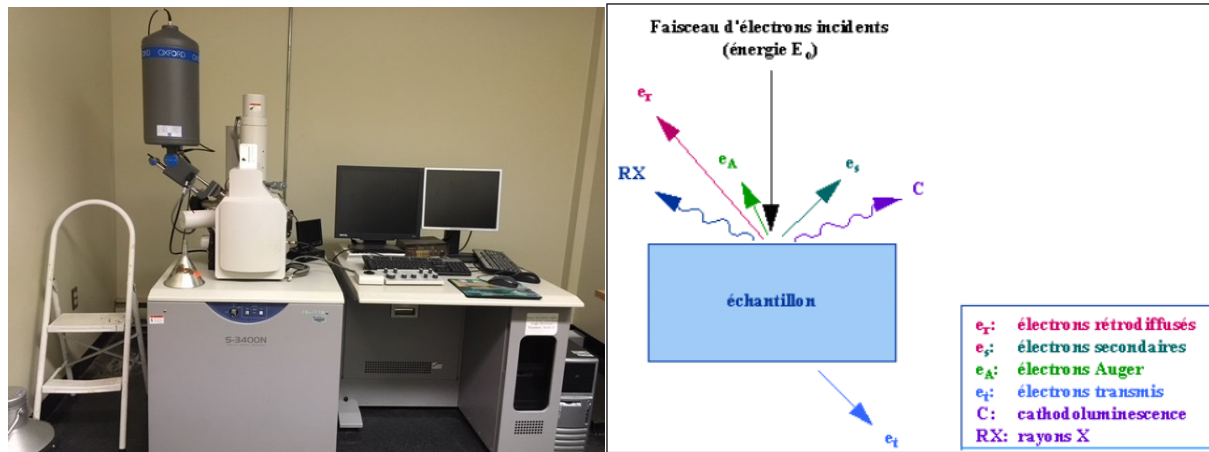
b) Exemple d'un spectre en énergie du rayonnement fluorescent d'un échantillon

Figure 3-7 : Description du fonctionnement de la fluorescence X (Eberhart, 1997; Martin et George, 1998)

3.5.3 Microscope électronique à balayage et analyses EDS

Grâce à la microscopie électronique à balayage (MEB), on peut examiner la morphologie de l'échantillon à des agrandissements pouvant atteindre 300 000 fois. On peut de plus obtenir un spectre dans lequel l'intensité des pics est fonction de la concentration de l'élément caractéristique dans l'échantillon. Les microscopes à balayage, Figure 3-8 partie A, sont des microscopes dont l'image est obtenue point par point (6 à 10 nm). Le principe du balayage consiste à explorer la surface de l'échantillon par lignes successives et à transmettre le signal du détecteur à un écran cathodique dont le balayage est exactement synchronisé avec celui du faisceau incident. Les microscopes à balayage utilisent un faisceau très fin qui balaie point par point la surface de l'échantillon, placé dans la chambre du microscope et reçoit un

flux d'électrons très important (bombardement), sous l'impact de ce flux d'électrons accélérés, des électrons rétrodiffusés et des électrons secondaires émis par l'échantillon, Figure 3-8 partie B, sont recueillis sélectivement par des détecteurs qui transmettent un signal à un écran cathodique dont le balayage est synchronisé avec le balayage de l'objet. L'appareil disponible au laboratoire est un MEB à pression variable de marque HITACHI S-3400N et assisté par INCAx-Sight qui effectue l'analyse élémentaire.



a) microscope électronique à balayage b) interaction entre un faisceau et la surface de l'échantillon
Figure 3-8 : Appareillage et fonctionnement de la microscopie électronique à balayage (Duval et Bouguillon, s.d.)

3.6 Essais à l'état frais

3.6.1 Affaissement

L'essai d'affaissement selon la norme ASTM C 143 est utilisé pour déterminer la consistance des gâchées de bétons conventionnels et de faible rapport $E/L = 0,40$. L'affaissement est mesuré à 10 min et à 30 min après contact eau-liant. L'équipement utilisé consiste en un cône d'affaissement qui est un moule métallique conique de 300 mm de hauteur, de 200 mm de diamètre de base et 100 mm de diamètre au sommet puis en une tige d'acier de 16 mm de diamètre et ayant une longueur comprise entre 450 mm et 600 mm avec une extrémité hémisphérique. Le cône humidifié est placé verticalement sur une surface solide, plane et non absorbante. On le remplit en trois couches de même volume approximativement et pilonnée à 25 coups chacune. Après le pilonnage et l'arasement de la dernière couche, le cône est soulevé lentement et le béton s'affaisse. Le cône vide est placé à proximité du béton. L'affaissement est la différence entre la hauteur du cône et celle de

l'échantillon affaissé, à partir du centre de la surface supérieure du béton, mesuré à 10 mm près, Figure 3-9.



Figure 3-9 : Essai d'affaissement sur béton conventionnel

3.6.2 Masse volumique

La masse volumique de tous les bétons est mesurée selon la méthode d'essai de la norme ASTM C 138. Le récipient utilisé est le contenant d'un air-mètre de 7,00 litres de volume, également utilisé pour déterminer la teneur en air. Le principe consiste à tarer ce contenant, à le remplir en trois couches de même volume et pilonnées à 25 coups par couche à l'aide de la tige en acier dont l'extrémité est hémisphérique. La dernière couche est bien arasée et l'ensemble est pesé sur une balance calibrée à $\pm 0,1$ g près. La masse volumique du béton est obtenue par le rapport entre la masse du béton et le volume du contenant. Ce même échantillon servira également à la détermination de la teneur en air.

3.6.3 Teneur en air du béton frais

Le volume d'air entraîné dans le béton frais peut être mesuré par trois différentes méthodes notamment la méthode gravimétrique, la méthode volumétrique et la méthode pressiométrique. C'est la dernière méthode qui est utilisée dans notre étude compte tenu de la fiabilité des résultats et de sa meilleure adaptation aux usages de chantier. Elle est réalisée selon la norme ASTM C 231. Son principe repose sur la relation entre le volume d'air et la pression appliquée donnée par la loi de Boyle Mariotte. L'appareil utilisé, Figure 3-10, est un air-mètre gradué en teneur en air. La procédure de l'essai consiste essentiellement à appliquer une pression sur un échantillon de béton à l'aide d'une pompe. La pression appliquée comprime l'air contenu dans le béton. Le volume de l'air comprimé, représentant la teneur en

air du béton, exprimé en pourcentage, est mesuré au moyen d'un manomètre. Cette teneur en air est lue directement par un opérateur.



Figure 3-10 : Air-mètre pressiométrique

3.6.4 Température

Puisque la température du béton a une grande influence sur les propriétés du béton frais et durci, beaucoup de spécification limite la température du béton frais. À cet effet, la température des gâchées est mesurée au moyen des thermomètres électroniques précis avec affichage numérique selon la norme ASTM C 1064. Le principe consiste à introduire la portion sensible du thermomètre d'au moins 75 mm dans un échantillon représentatif du béton pendant au moins 2 minutes ou jusqu'à ce que la lecture se stabilise. Cette température est mesurée à chaque échéancier prévu pour prendre les mesures des propriétés à l'état frais.

3.6.5 Prélèvement des échantillons et murissement

Le prélèvement des échantillons a été effectué suivant la norme ASTM C 192. Les moules cylindriques de 100×200 mm sont remplis en deux couches d'égale volume et pilonnés à 25 coups chacune par la tige en acier de diamètre 10 mm et dont l'extrémité est hémisphérique. Les échantillons sont bien arasés dans les moules, recouverts de sac en

plastique étanche pour limiter l'évaporation de l'eau puis entreposés à l'air sur une table pendant 24 heures. Des prismes de différentes dimensions et de plaques sont également échantillonnés. À l'âge de 24 ± 4 heures, les échantillons sont démoulés puis mûris dans une chambre humide à une température de $23,0 \pm 2$ °C et humidité relative de 100 % jusqu'aux échéanciers des essais.

3.7 Essais à l'état durci

3.7.1 Résistance à la compression

L'essai de résistance à la compression est réalisé sur des cylindres de 100×200 mm, Figure 3-11, conformément à la norme ASTM C 39. Les valeurs de la résistance à la compression à 1, 3, 7, 28, 56, 91, 180 et 365 jours sont des moyennes de deux à trois cylindres. Les cylindres sont surfacés pour favoriser un meilleur contact entre ces derniers et les plateaux de la presse lors de l'écrasement. La capacité maximale de la presse est de 1779,2 kN. Le taux de chargement appliqué sur les cylindres est de 5000 lb/10s soit 0,28 MPa/s.

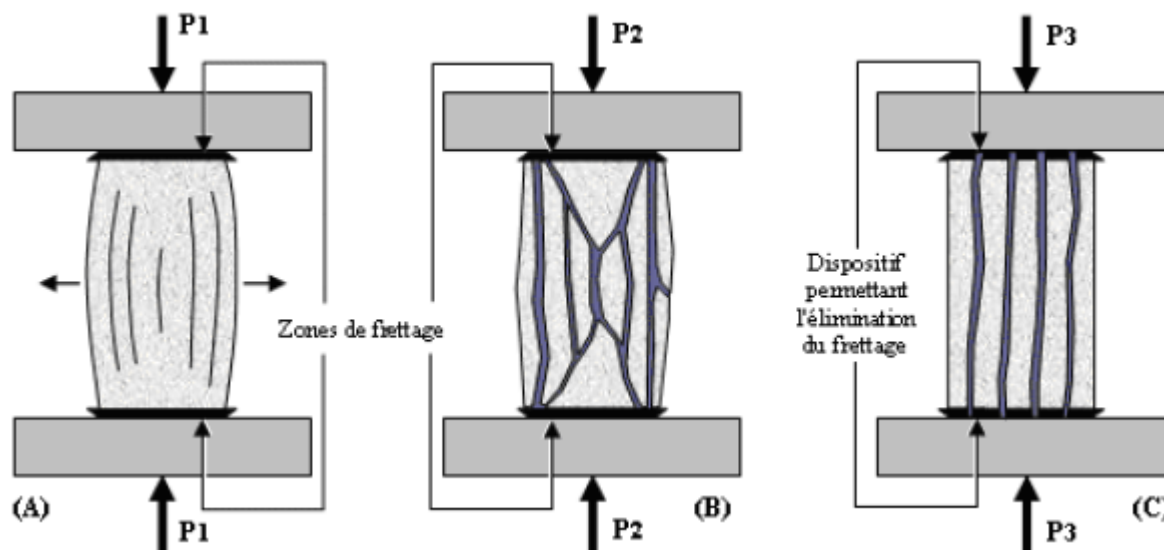


Figure 3-11 : Essai de résistance à la compression

3.7.2 Résistance à la traction par fendage

L'essai est réalisé conformément à la norme ASTM C 496, sur des cylindres de 100×200 mm, Figure 3-12. Les valeurs de la résistance à la traction retenues à 28 jours et 91 jours

représentent la moyenne des résultats obtenus sur deux échantillons. Une presse hydraulique d'une capacité maximale de 270 kN a été utilisée. Le taux de chargement appliqué sur les cylindres est de 1200 lb/10s soit 1 MPa/min. L'essai consiste à écraser un cylindre de béton suivant deux génératrices opposées entre les plateaux d'une presse. Cet essai est souvent appelé « Essai Brésilien ». Si P est la charge de compression maximale produisant l'éclatement du cylindre par mise en traction du diamètre vertical, la résistance en traction sera :

$$f_{tj} = 2 \frac{P}{\pi DL} \quad (3.1)$$

avec : j = âge du béton (en jours) au moment de l'essai ;
 D et L = diamètre et longueur du cylindre.

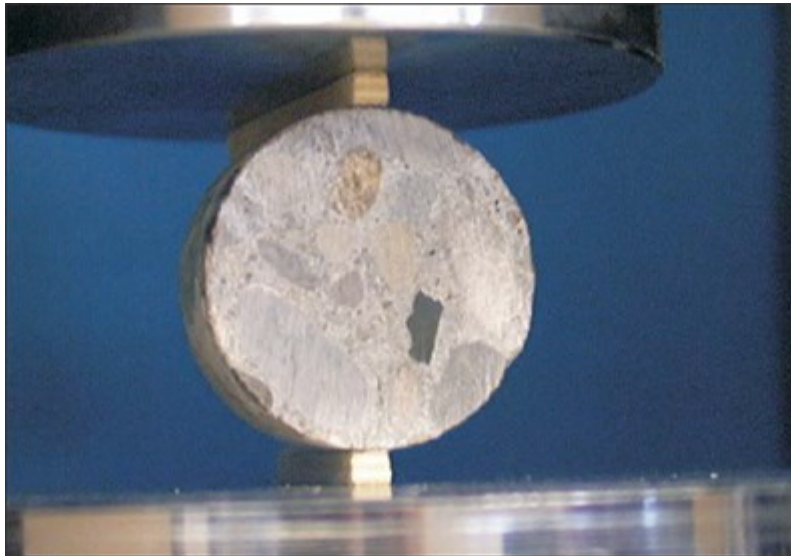


Figure 3-12 : Essai de résistance à la traction par fendage

3.7.3 Résistance en flexion

Cet essai est effectué selon la norme ASTM C 78, un prisme de $100 \times 100 \times 400$ mm de béton non armé,

Figure 3-13, est soumis à un effort de flexion par application jusqu'à rupture d'une charge en deux points symétriques. Les points d'application de la charge sont placés au tiers de la portée. L'essai est également appelé l'essai de chargement au tiers. La contrainte théorique maximale de traction atteinte sur la fibre inférieure du prisme correspond au module de rupture. Lorsque la rupture a lieu au tiers central de l'échantillon, le module de rupture est obtenu par la formule présentée à l'équation 3.2.

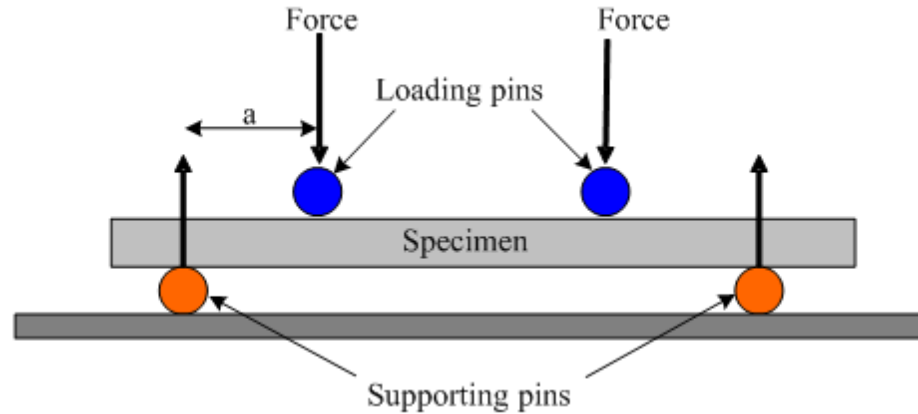


Figure 3-13 : Essai de flexion

$$R = \frac{PL}{bd^2} \quad (3.2)$$

Où

R = le module de rupture,
 P = charge maximale appliquée
 L = longueur de l'échantillon
 b = largeur de l'échantillon
 d = profondeur de l'échantillon

Si la rupture a lieu en dehors du tiers central, mais à une distance, α de l'appui le plus proche, inférieure à 5 % de la longueur totale L de l'échantillon, le module de rupture est calculé comme le montre l'équation 3.3.

$$R = \frac{3P\alpha}{bd^2} \quad (3.3)$$

3.7.4 Module d'élasticité

L'essai est réalisé selon la norme ASTM C 469 sur des cylindres 100×200 mm. Il consiste à déterminer le rapport contrainte-déformation longitudinale dans la région élastique de la courbe contrainte-déformation d'un béton, donnée par la Figure 3-14.

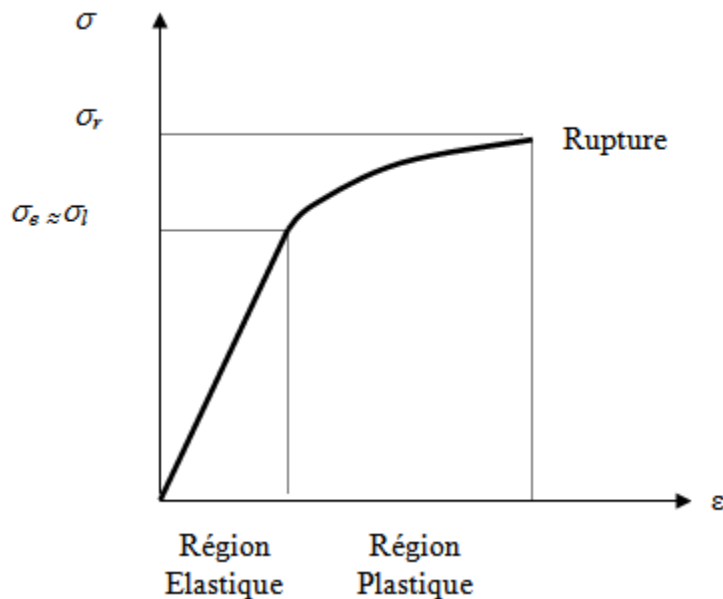


Figure 3-14 : Courbe contrainte déformation du béton

Ce rapport définissant le module d'élasticité (E) de ce béton peut s'exprimer comme suit :

$$E = \frac{S_2 - S_1}{\varepsilon_2 - \varepsilon_1} \quad (3.4)$$

Où E est le module d'élasticité en psi.

S_1 est la contrainte correspondante à la déformation longitudinale $0,000050$; $\varepsilon = 2 \varepsilon$ est la déformation produite par la contrainte S_2 .

S_2 est la contrainte correspondante à 40 % de la charge ultime.

3.8 Durabilité

3.8.1 Retrait de séchage

Cet essai sert à déterminer le changement de longueur d'un échantillon de béton causé par le séchage. L'essai est effectué sur des échantillons de $75 \times 75 \times 285$ mm, suivant la norme ASTM C 157M – 04. Après démoulage à 24 heures, les échantillons sont directement immergés dans l'eau saturée en chaux durant 30 minutes, puis ressortie pour les lectures initiales et ensuite retournées pour y séjourner durant 27 jours. À partir de 28 jours depuis la fabrication du béton, les échantillons sont sortis de l'eau, une seconde mesure est immédiatement prise puis ils sont conservés à l'air dans une chambre à une température de 23

$\pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ et à une humidité relative de $50 \pm 4\%$ où se poursuit la mesure du retrait suivant les échéanciers de la norme. Ces échéanciers sont de 4, 7, 14, 28 jours et 8, 16, 32 et 64 semaines à partir de la conservation dans l'air. Les mesures sont prises au moyen d'un comparateur, Figure 3-15 et la formule pour calculer le retrait en pourcentage de la longueur initiale de l'échantillon est présenté à l'équation 9.

$$\Delta L_x = \frac{CRD - initialCRD}{G} \quad (3.5)$$

Où ΔL : Retrait (%) ;

CRD : Lecture du comparateur à l'échéancier X (mm) ;

$InitialCRD$: Lecture du comparateur juste après le démoulage (mm)

G : Longueur initiale de l'échantillon (mm).



Figure 3-15 : Appareil de mesure pour le retrait de séchage

3.8.2 Résistance aux cycles de gel/dégel

La résistance aux cycles de gel-dégel a été évaluée selon la norme ASTM C 666, procédure A, sur deux éprouvettes de $75 \times 75 \times 350$ mm munis de plots sur leurs deux faces latérales. Deux échéances sont prévues soit 28 et 91 jours. Les échantillons subissent 6 cycles par jour à température variable de -18°C à $+4^{\circ}\text{C}$. Le temps de passage d'une onde ultrasonore (en μsec) d'une fréquence longitudinale, communément appelé pundit, perte de masse et les déformations longitudinales ont été mesurés chaque semaine et permettent de déterminer le facteur de durabilité.

3.8.3 Résistance à l'écaillage

3.8.3.1 Essai selon la norme BNQ

La résistance à l'écaillage des bétons exposés aux sels de déverglaçage (solution aqueuse de 3 % massique de NaCl) a été évaluée sur des plaques mûries dans la chambre humide jusqu'à 14 ou 77 jours respectivement pour les échéanciers prévus pour l'essai de 28 jours et 91 jours d'âge du béton. L'essai est réalisé en suivant la norme BNQ 2621-900 sur des plaques d'au moins 500 cm^2 de surface utile et d'épaisseur 75 mm. En effet pour l'échéancier de 28 jours d'âge du béton, les plaques sont sorties de la chambre humide après 14 jours d'âge puis conservées dans l'air dans une chambre à une température de $23 \pm 2^{\circ}\text{C}$ et une humidité relative de $50 \pm 4\%$. Le cadrage est effectué à 21 jours, la solution saline est appliquée à 28 jours et maintenue pendant 7 jours avant que les cycles de gel-dégel ne débutent à partir de 35 jours d'âge du béton. Quant à l'échéancier de 91 jours, les plaques sont sorties de la chambre humide après 77 jours d'âge puis conservées dans les mêmes conditions décrites précédemment. Le cadrage est effectué à 84 jours, la solution saline est appliquée à 91 jours et maintenue pendant 7 jours avant que les cycles de gel-dégel ne débutent à 98 jours d'âge du béton. Un cycle de gel-dégel a une durée de 24 heures consistant en une période de gel de $16\text{ h} \pm 1\text{ h}$ à une température de -18°C suivie d'une période de dégel de $8\text{ h} \pm 1\text{ h}$ à une température de $+23^{\circ}\text{C}$. Ce cycle se répète 56 fois sans interruption. La mesure de l'écaillage est effectuée à 7, 21, 35 et 56 cycles. À chaque mesure, on rince la surface de l'éprouvette avec une eau pure pour enlever tous les débris, qui sont ensuite lavés, filtrés sur un tamis de $80\text{ }\mu\text{m}$, séchés à

l'étuve puis pesés. Les résultats sont exprimés en g/m². À la fin de chaque mesure, la surface de l'éprouvette est examinée visuellement et le type d'écaillage obtenu est caractérisé qualitativement en utilisant le barème du Tableau 3-6 suivant.

Tableau 3-6 : Évaluation visuelle des échantillons de béton soumis à l'essai d'écaillage BNQ2621-900	
Cote	Évaluation visuelle de la surface écaillée
0	Aucun écaillage significatif observé
1-A	Écaillage très léger du mortier de surface avec absence de cratères
1-B	Écaillage important du mortier de surface avec absence de cratères
2-A	Aucun écaillage significatif du mortier de surface, mais présence de quelques cratères
2-B	Aucun écaillage significatif du mortier de surface, mais présence de plusieurs cratères
3	Combinaison du mortier de surface écaillé principalement avec de gros granulats éclatés
4	Combinaison de gros granulats éclatés principalement avec du mortier de surface écaillé

3.8.3.2 Essai selon la norme ASTM

Cet essai est réalisé en suivant la norme ASTM 672 sur la résistance à l'écaillage. Les échantillons doivent avoir une surface d'au moins 0,045 m² et 75 mm d'épaisseur. Les plaques sont remplies en une couche et la consolidation se fait au taux d'un coup pour 1400 mm² de surface. Il faut laisser un excédent de bétons à la fin. Araser avec la barre en bois et laisser reposer. Une fois le ressuage terminé, faire la finition de la surface en effectuant 3 passes avec un mouvement de cisaillement. Ensuite, couvrir d'une grille et placer une jute humide par-dessus. Démouler les échantillons entre 20 et 24 h et la placer dans la chambre humide. Sortir les échantillons de la chambre humide après 14 jours de murissement et laisser dans une salle à température et humidité contrôlée soit 23 ± 2 °C et entre 45 et 55 % d'humidité pour 14 jours.

Couvrir l'échantillon d'une solution de chlorure de calcium anhydre (4 % de concentration) sur une épaisseur de 6 mm. Placer les plaques dans un congélateur et geler les échantillons pour une période de 16 à 18 h. Ensuite, sortir du congélateur et placer à une température de 23 ± 2 °C et entre 45 et 55 % d'humidité pour 6 à 8 h. Ajuster le niveau d'eau entre chaque cycle. Répéter ce cycle chaque jour. À la fin de 5 cycles de gel/dégel, bien nettoyer la surface et recueillir les débris. Ensuite, inspecter visuellement la surface et ajouter

la solution à nouveau et continuer le test jusqu'à 50 cycle complété. Le Tableau 3-7 présente les critères d'inspections visuelles.

Tableau 3-7 : Évaluation visuelle des échantillons de béton soumis à l'essai d'écaillage ASTM C672

Évaluation visuelle de la surface écaillée
0 = Aucun écaillage
1 = Écaillage très léger (3 mm max., aucun gros granulat visible)
2 = Écaillage léger à modérer
3 = Écaillage modéré (quelques gros granulats)
4 = Écaillage modéré à sévère
5 = Écaillage sévère (gros granulats visibles sur la surface entière)

3.8.4 Pénétrabilité des ions chlore

La pénétrabilité des ions chlorures permet d'évaluer l'inter connectivité des pores dans le béton. Cet essai est effectué suivant la norme ASTM C 1202 sur des éprouvettes de 95 mm de diamètre et 50 mm d'épaisseur. Ces éprouvettes sont extraites à partir d'un cylindre de 100 mm de diamètre sur 200 mm de hauteur. L'éprouvette est placée dans une cellule de telle façon que l'une des faces circulaires baigne dans une solution de 3 % de chlorure de sodium (NaCl) dans laquelle se trouve une électrode (cathode) émettrice d'électrons. L'autre face circulaire baigne dans une solution de soude (0,3 N de NaOH) où se trouve une autre électrode (anode) qui boucle le circuit. Une différence de potentielle (ddp) de 60 volts est maintenue entre les deux extrémités de l'éprouvette, Figure 3-16. L'essai consiste à mesurer la charge électrique totale, exprimée en coulombs qui passe à travers l'éprouvette pendant 6 heures. La charge mesurée exprime la pénétrabilité aux ions chlore à travers l'échantillon. Les résultats sont interprétés par référence aux valeurs du Tableau 3-8 qui exprime le niveau de pénétrabilité aux ions chlore dans l'échantillon en fonction de la charge.

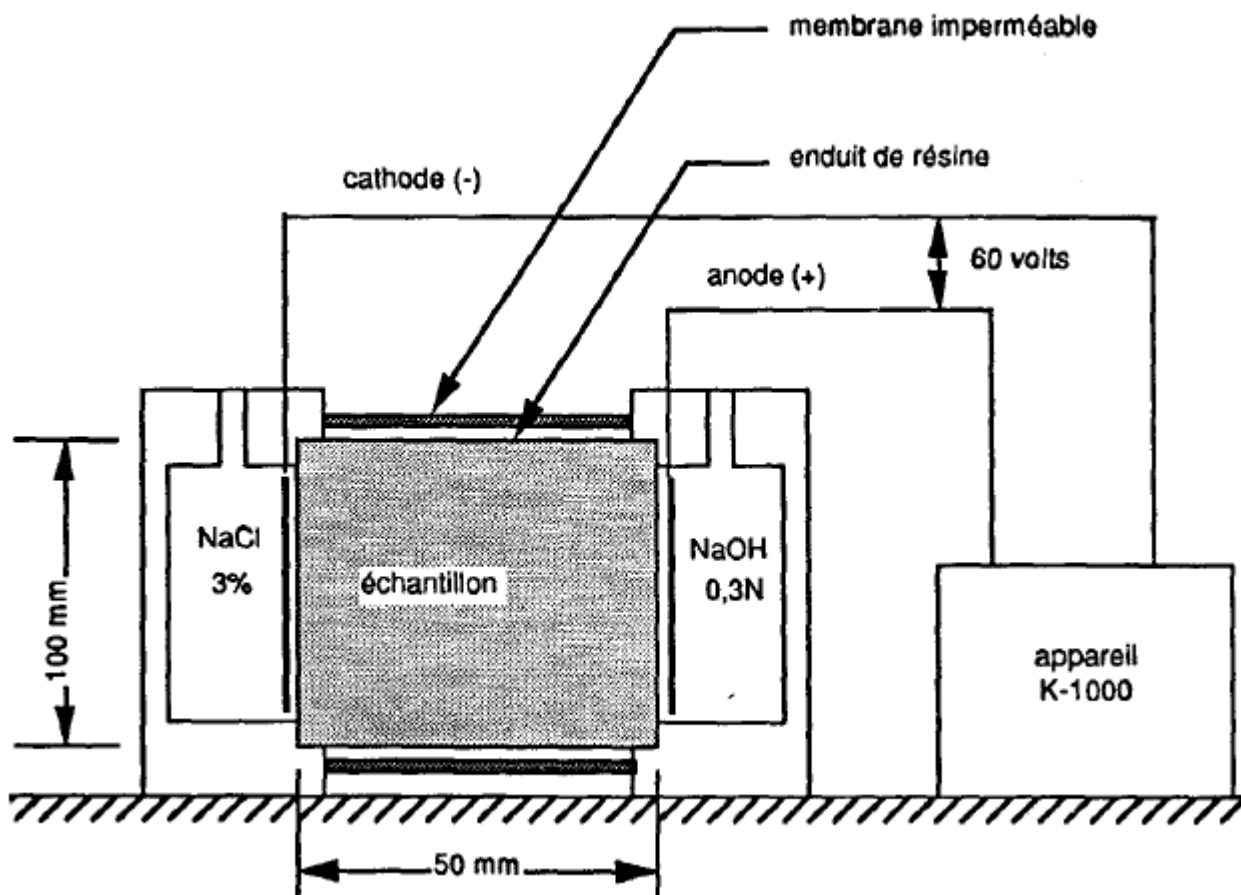


Figure 3-16 : Dispositif de l'essai de pénétrabilité aux ions chlore (Gagné, 2014)

Tableau 3-8 : Niveau de perméabilité aux ions chlore en fonction de la charge

Charge en coulombs	Pénétrabilité des ions chlore
>4000	Élevée
2000-4000	Moyenne
1000-2000	Faible
100-1000	Très faible
<100	Négligeable

3.8.5 Résistivité électrique

Cet essai est une méthode plus rapide que l'essai de perméabilité aux ions chlore. L'essai consiste à faire passer un courant électrique au travers d'un échantillon de béton. La résistivité obtenue est un indice de la difficulté que le courant électrique a eu pour traverser

l'échantillon, Figure 3-17. Plus cette résistivité est élevée, plus le béton est résistant à la corrosion.



Figure 3-17 : Appareil pour mesurer la résistivité électrique

Les résultats de cet essai peuvent être comparés aux résultats de perméabilité aux ions chlore où les classes de perméabilité rejoignent celle de la résistivité (Tableau 3-9).

Tableau 3-9 : Niveau de risque de corrosion versus le niveau de perméabilité aux ions chlore
Résistivité électrique Pénétrabilité des ions chlorure

Résistivité (k Ω cm)	Classe de durabilité potentielle	Charge (coulombs)	Classe de pénétrabilité des ions chlorure
<5	élevée	>4000	Élevée
5-10	modérée	2000-4000	Moyenne
10-20	faible	1000-2000	Faible
20-200	très faible	100-1000	Très faible
>200	négligeable	<100	Négligeable

3.8.6 Résistance à la réaction alcalis-granulats sur prismes de béton

Les essais de la réaction alcalis-granulats sont effectués sur les prismes de bétons suivant la norme CSA A23.2-14A. L'essai consiste à déterminer les expansions des bétons causées par la réaction alcalis-granulats. L'objectif de cet essai est d'évaluer l'efficacité des

ajouts cimentaire dans le contrôle de la réaction alcalis silice. Les prismes sont de dimensions 75 x 75 x 275 mm. Les gros granulats utilisés sont soit des granulats réactifs de type Spratt soit des agrégats de verre, divisés en fractions tel que recommandé dans la norme CSA A23.2-14A. Le dosage en liant est de 420 kg/m³ avec un rapport E/L = 0,45. La teneur en alcalis du ciment exprimée en Na₂O_{équivalent} est ajustée à 1,25 % en ajoutant du NaOH dans l'eau de gâchage. Les prismes sont conservés dans des chaudières munies de tissus absorbants permettant de maintenir l'humidité relative constante. L'ensemble est placé dans une chambre environnementale à 38 °C, jusqu'aux échéanciers d'essais prévus par la norme où l'expansion des prismes est mesurée au moyen d'un comparateur, Figure 3-18.



Figure 3-18 : Chambre environnementale pour l'essai de RAG

3.8.7 Essai accéléré de carbonatation

Le protocole élaboré par le CEN Technical specification. Le protocole est appelé prCEN/TS 12390-XXX:2008 (E). Cet essai nécessite des prismes de béton de 100x100x400 entreposé dans une chambre de murissement pendant 56 jours. Ensuite, il faut les sortir de cette dernière et les entreposer dans une chambre à température variant entre 18 et 25°C et humidité relative entre 50 et 65 % pendant 14 jours. Sceller les bouts, le dessous et le dessus du prisme de façon à laisser 2 côtés opposés exposés à l'air. Prendre une lecture massique initiale. Couper un morceau de 5 cm d'épaisseur sur 2 des trois prismes. Sceller l'extrémité

coupée sur les prismes et déposer les trois prismes dans la chambre de carbonatation à humidité $55 \% \pm 5\%$, à température de $20 \pm 2 ^\circ\text{C}$ et à teneur en CO_2 de $4,0 \pm 0,5 \%$ (Figure 3-19). Pendre les tranches de béton et les fracturer de sorte à avoir une fracture fraîche ayant les deux faces non scellées comme extrémité. Ensuite, vaporiser une solution de phénolphthaléine à concentration de 1 % dans 70 % d'alcool sur la fracture. Cette solution réagit avec le béton sain où le pH est encore très élevé et colore la surface en rose. Lorsque le béton est carbonaté, le pH diminue et la solution ne réagit pas. Il est donc possible de mesurer la profondeur de carbonatation. Il faut attendre une heure après l'application de la solution et faire la moyenne de 5 lectures.



Figure 3-19 : Chambre de carbonatation

3.8.8 Réseau d'air dans le béton durci

Cet essai consiste à mesurer, à l'aide du microscope optique et à partir d'un réseau de lignes horizontales, les principales caractéristiques du réseau d'air entraîné dans le béton durci, selon la norme ASTM C457. Les principales caractéristiques mesurées sont le facteur d'espacement \bar{L} qui représente la demi-distance moyenne entre deux bulles d'air, la surface spécifique α des bulles d'air et leur volume ou teneur en pourcentage. Le facteur d'espacement \bar{L} est la caractéristique étroitement liée au diamètre des bulles d'air et contrôle mieux la résistance des bétons aux cycles de gel-dégel.

CHAPITRE 4 PRÉSENTATION, ANALYSE ET DISCUSSION DES RÉSULTATS

4.1 Étude sur l'utilisation du verre de source électronique sous forme de remplacement cimentaire dans les bétons

4.1.1 Mortiers

La première étape de cette phase du projet a été effectuée sur des mortiers afin de déterminer l'indice pouzzolanique de la poudre de verre électronique à différents taux de remplacement. Le Tableau 4-1 présente la formulation des mortiers réalisés.

Tableau 4-1 : Formulation des mortiers incluant de la PVE

	Témoin	10% PVE	20% PVE	30% PVE	10% PVE-2	20% PVE-2	30% PVE-2
Ratio E/L	0.485	0.485	0.485	0.485	0.485	0.485	0.485
Ciment GU	1000	900	800	700	900	800	700
PVE	0	100	200	300	100	200	300
Eau	485	485	485	485	485	485	485
Sable	2750	2750	2750	2750	2750	2750	2750

La Figure 4-1 et le Tableau 4-2 présentent les résultats des essais réalisés sur les mortiers. Les taux de remplacements étudiés sont 10, 20 et 30%. Cette étape a été utile pour déterminer quels bétons seront confectionnés. Les mortiers contenant de la PVE ont été réalisés en duplicata (PVE-2).

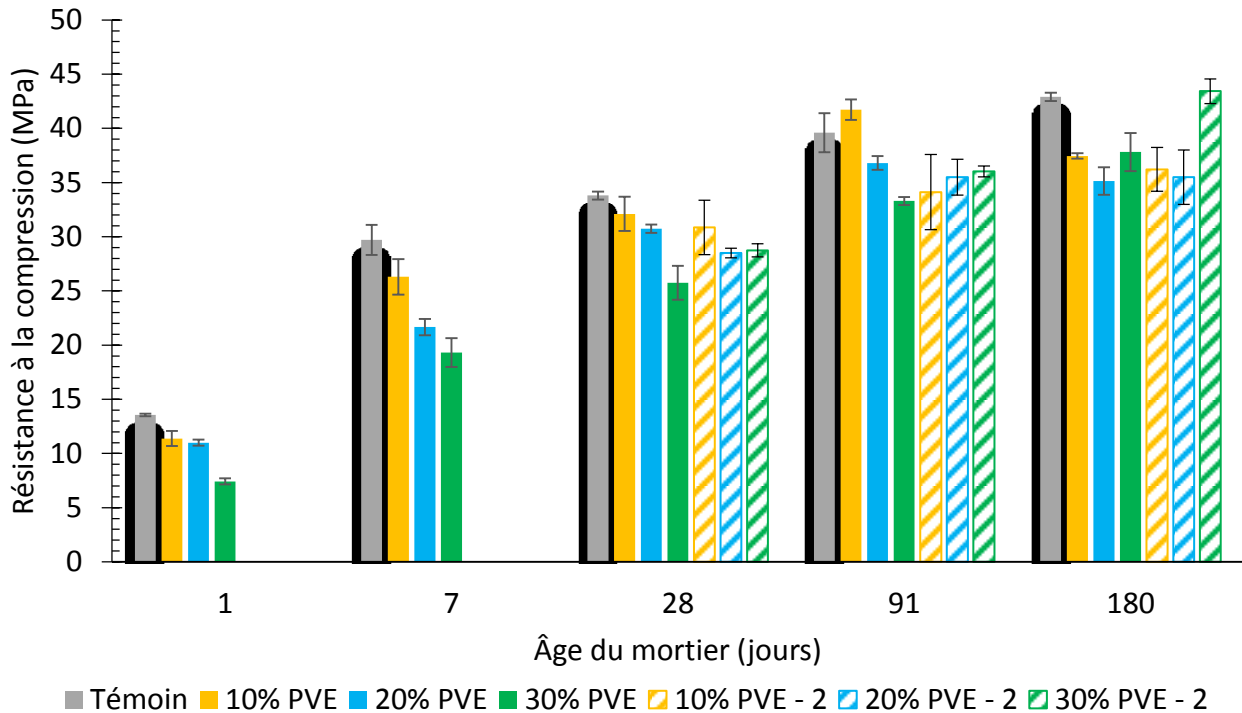


Figure 4-1 : Résistance à la compression des mortiers incorporant la PVE

Les résultats à jeune âge montrent un comportement similaire à un béton avec ajouts cimentaires, c'est-à-dire qu'à jeune âge (28 jours et moins) les résistances développées sont inférieures à celles du témoin et plus le taux de remplacement est élevé plus la résistance sera affectée. Cela est dû au fait que les ajouts cimentaires nécessitent plus de temps pour s'hydrater et former des gels de C-S-H. à 91 jours il y a une augmentation importante de la résistance des mortiers contenant 10 % de PVE surpassant ainsi le témoin. Les mortiers avec 20 et 30 % de PVE n'ont pas dépassé le témoin. Pour ce qui est de l'échéance de 180 jours, on pourrait s'attendre à ce que le mélange contenant 10 % de PVE dépasse encore le témoin, mais cela n'est pas le cas. Cela laisse croire à une possible erreur de manipulation pour une des deux dernières échéances. Les mortiers 10, 20 et 30 % PVE ont été repris pour les échéances de 28, 91 et 180 jours. Les résultats des mortiers repris sont représentés par les barres hachurées. Ces reprises montrent des valeurs proches de celles originales pour la plupart des échéances. Cependant, il y a une différence marquée pour le mortier 10 % PVE à 91 jours où les résultats repris sont inférieurs au témoin alors qu'à 180 jours les résultats de ce même mélange sont très semblables entre la reprise et l'original. Pour les reprises des mortiers 20 et 30 % PVE, il n'y a pas beaucoup de différence entre les résistances à la compression obtenues.

À jeune âge, ces derniers ont développé des résistances inférieures au témoin et au mortier contenant 10 % de PVE pour les échéances de 91 et 180 jours ceux-ci ont surpassé le mélange 10 % PVE sans toutefois atteindre le témoin. Cependant, il y a eu une augmentation importante du mélange 30 % PVE à 180 jours allant même à surpasser le témoin.

Tableau 4-2 : Indices pouzzolaniques des mortiers incorporant de la PVE
Indices Pouzzolaniques (%)

	7	28	91	180
10% PVE	0.89	0.95	1.05	0.87
20% PVE	0.73	0.91	0.93	0.82
30% PVE	0.65	0.76	0.84	0.88
10% PVE -2	-	0.91	0.86	0.84
20% PVE -2	-	0.84	0.90	0.83
30% PVE -2	-	0.85	0.91	1.01

La norme ASTM C311 précise un taux de remplacement de 20% du ciment par un ajout cimentaire et la norme C618 traitant des cendres volantes précise qu'il faut un indice de pouzzolanité de 75% à 28 jours. Les critères de cette norme sont utilisés, car la PVE et les cendres volantes sont des ajouts cimentaires qui demande du temps pour réagir. En observant les résultats du Tableau 4-2, montrent bien qu'à un taux de 28 jours les mortiers d'essais a un taux de 20% de remplacement sont conforme aux exigences de la norme. Même avec un taux de remplacement supérieur à 20%, les mortiers étudiés respectent ces exigences.

4.1.2 Formulation des bétons

La formulation des bétons utilisés pour cette partie du projet est présentée au Tableau 4-3. Les bétons de rapport E/L 0,50 ont été les principaux bétons utilisés. Les bétons de rapport E/L de 0,55 ont été utilisés pour vérifier si la PVE peut entraîner de l'air et comparer ces résultats avec la PV

Tableau 4-3 : Formulation des bétons contenant de la PVE

	Ratio E/L 0,50			Ratio E/L 0,55		
	Témoin	20% PVE	30% PVE	Témoin	30% PV	30% PVE
Ciment GU (kg)	350	280	245	350	245	245
PVE (g)	---	70	105	---	--	105
PV (kg)	---	---	---	---	105	---
Eau (kg)	175	175	175	192.5	192.5	192.5
Sable (kg)	696	686	681	650	634	634
Pierre 5-14m (kg)	856	856	856	856	856	856
Pierre 10-20m (kg)	214	214	214	214	214	214
AIREX-L (ml/100kg liants)	49	44	39	---	---	---
EUCON DX (ml/100kg liant)	195	174	171	---	---	---

4.1.3 Essais à l'état frais

4.1.3.1 Bétons échantillonnés

Le Tableau 4-4 présente les propriétés à l'état frais des bétons qui contiennent de la PVE. Les bétons présentés dans ce tableau présentent la campagne d'échantillonnage de rapport E/L 0,50. Un mélange témoin, un avec 20% PVE et un dernier avec 30% PVE ont été réalisées. Seuls les bétons de rapport E/L de 0,50 ont été échantillonnés.

Tableau 4-4 : Propriétés à l'état frais des bétons incorporant la PVE

Propriétés	Témoin 0,50		20% PVE - 0,50		30% PVE - 0,50	
	10 min	30 min	10 min	30 min	10 min	30 min
Date de la coulée	2014-04-15		2014-04-29		2014-05-14	
AEA (AIREX-L) (ml/100kg liants)	49		44		39	
RE EUCON DX (ml/100kg liants)	195		174		171	
Affaissement (mm)	185.0	162.5	185.0	172.5	200.0	182.5
Air (%)	8.6	8.6	9.3	9.0	7.5	7.0
Masse volumique (kg/m³)	2254	2260	2220	2227	2264	2286
Température (°C)	22.20	22.15	22.20	22.05	22.65	22.70

Les bétons réalisés lors de cette campagne ont un affaissement entre 160 et 190 mm. La teneur en air visée est entre 5 et 8 %. Les teneurs en air pour le témoin, 20% PVE et 30% PVE sont respectivement de 8,6%, 9,0%, 7,0%. Les teneurs en air du témoin et de 20% PVE sont légèrement supérieures à la limite souhaitée. Cependant, tous les mélanges réalisés ont été échantillonnés dû à la grande quantité de bétons à échantillonner et le grand nombre de ressources mobilisées.

Comme le tableau le montre, l'ajout de PVE a permis de diminuer la quantité d'adjuvants ceci indique donc que la PVE permet d'améliorer partiellement la maniabilité du béton. Cela est dû probablement au fait que la PVE n'a pas d'absorption ce qui libère donc de l'eau pour lubrifier le béton et améliorer sa maniabilité. De plus, les particules riches en silice, tel la PVE sont chargées négativement en milieu fortement alcalin, les adjuvants anioniques auront donc peu tendance à s'adsorber sur de telles particules. La quantité d'agents entraîneur d'air a également été diminuée, mais la teneur en air est demeurée élevée pour le béton 20%PVE. Cette information est contradictoire avec les données du tableau qui montrent que sans ajout chimique, la PVE obtient la même teneur en air qu'un béton avec 100% ciment GU, soit 0,6%. Cela laisse donc croire qu'il y a une interaction entre la PVE et les ajouts chimiques utilisés. Des études supplémentaires doivent être effectuées pour confirmer cette hypothèse.

4.1.3.2 Évaluation de l'effet entraîneur d'air de la PVE

Cette étape a été ajoutée suite à la réalisation de différents essais sur la PV montrant que cette dernière a un effet d'entraînement d'air dans les matrices cimentaires. La PVE a donc été évaluée dans les mêmes conditions pour voir si le même phénomène s'observerait également dans les matrices cimentaires dans lesquelles elle serait incorporée. Une des hypothèses porte sur le traitement du verre mixte où il reste encore des traces de matière organique et autres indésirables pouvant affecter l'entraînement d'air. Des bétons de rapport E/L de 0,55 avec 30% de remplacement cimentaire et sans adjuvant chimique ont été réalisés et les propriétés à l'état frais sont présentées au Tableau 4-5.

Résultats à l'état frais	Tableau 4-5 : Résultats à l'état frais sans AEA					
	Témoin 0,55		30PV 0,55		30PVE 0,55	
	10 min	30 min	10 min	30 min	10 min	30 min
Date de la coulée	11/02/2015		11/02/2015		11/02/2015	
Affaissement (mm)	210	170	210	195	190	190
Air (%)	0.60	0.60	4.2	4.6	0.60	0.70
Masse volumique (kg/m ³)	2417	2420	2314	2313	2393	2401
Température (°C)	19.1	18.7	18.3	17.9	16.4	16.5

Les résultats de ce tableau montrent bien que la PVE n'a pas d'effet d'entraînement d'air lorsque comparés à un témoin alors que la PV a un effet d'entraînement d'air avec 4% d'air en plus que le témoin ou le béton avec PVE. Ces résultats sont consistants avec l'hypothèse énoncée puisque le verre électronique n'est en contact avec aucun contaminant organique qui pourrait entraîner de l'air. Les éléments organiques s'il y a ont disparu lors de la fonte.

4.1.4 Essais de propriétés mécaniques

Les résultats des essais présentés sont également comparés aux résultats des travaux de Zidol. Les résultats de résistance à la compression, de la perméabilité aux chlorures et de la résistivité électrique ont un rapport E/L de 0,50 et proviennent d'une campagne d'essais en vue de faire la fiche technique de la poudre de verre produite par Tricentris (Zidol et Tagnit-Hamou, 2015). Les autres résultats de PV étudiés proviennent des travaux de (Zidol, 2009) et ont un rapport E/L de 0,55 alors que les bétons avec PVE ont un rapport E/L de 0,50. Zidol a étudié différents types de PV dans ses travaux de maîtrise. Celle qui est comparée est celle avec un temps de broyage de 6 x 25 minutes, puisqu'il s'agit du même temps de broyage que la PVE.

4.1.4.1 Résistance à la compression

La Figure 4-2 présente les résistances à la compression des bétons qui contiennent de la PVE. Les résultats obtenus sont comparés à des essais en compression sur des bétons incorporant de la poudre de verre post-consommation (couleurs hachurées).

Les résistances à la compression augmentent progressivement plus l'âge du béton augmente. À 28 jours, le béton avec 30% de PVE rattrape le mélange avec 20% de PVE. Cette tendance se maintient sur les échéances suivantes. À jeune âge les bétons incorporant de la PV à rapport E/L identique ont développé des résistances à la compression plus élevée que leurs homologues contenant de la PVE. Ceci peut être dû à la finesse plus élevée de la PV qui augmente la réactivité de la PV. À 28 jours, les bétons incorporant des ajouts cimentaires ont des résistances à la compression similaires et même qu'à 91 jours, les bétons de PVE ont légèrement dépassé les bétons de PV. Ces résultats vont en accord avec l'hypothèse que la PVE va avoir un comportement similaire à la PV.

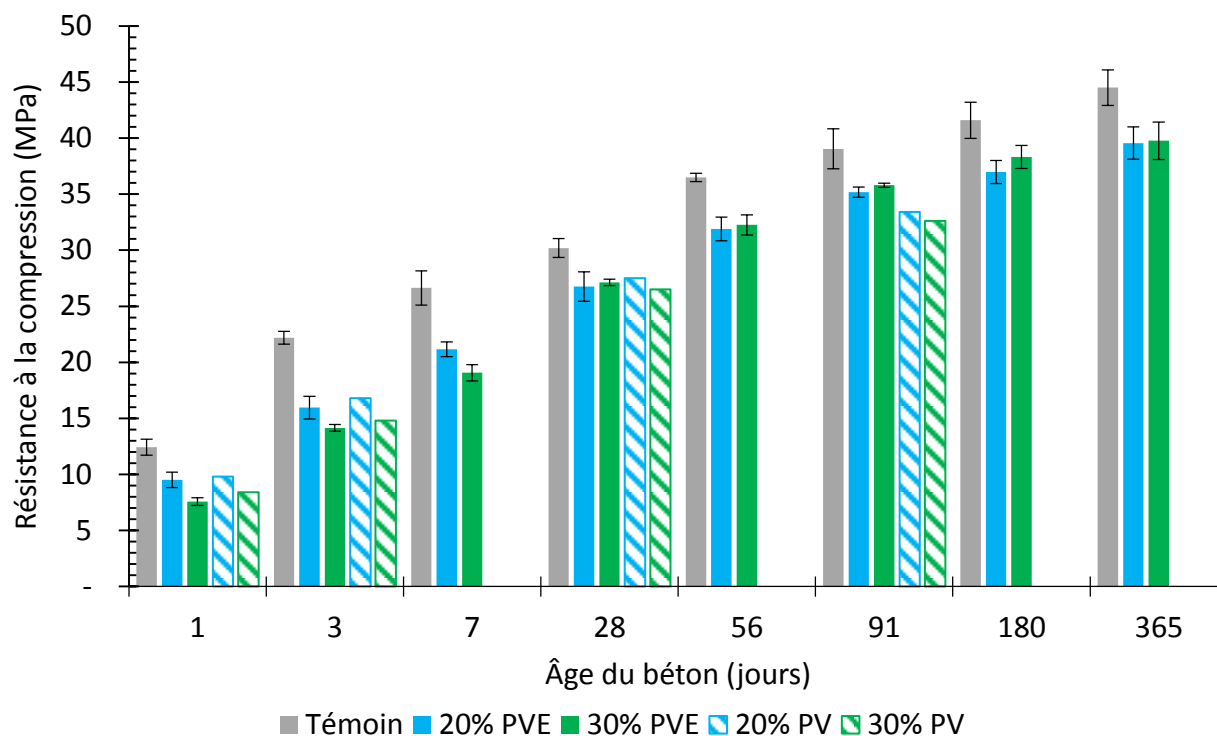


Figure 4-2 : Résistance à la compression de bétons incorporant de la PVE

Le Tableau 4-6 présente les indices pouzzolaniques pour les bétons incorporant la PVE. La norme CSA A3004-E1 précise qu'un ajout cimentaire de type B (réaction lente améliorant les propriétés à long terme) doit avoir un indice pouzzolanique de 75% de la résistance à la compression du béton de référence à 28 jours et 85% à 90 jours pour un rapport E/L de 0,50 et une teneur en air se situant entre 5 et 8%. Ici, les bétons avec 20% et 30% de remplacement cimentaire ont un indice stable à partir de 28 jours se situant à près de 90%. Donc la PVE est un matériau ayant une réaction pouzzolanique. Les résultats montrent aussi cette tendance, car s'il y avait seulement un effet de remplissage, l'indice de pouzzolanité ne pourrait se maintenir stable dans le temps.

Tableau 4-6 : Indices de pouzzolanité de bétons incorporant de la PVE
Indices Pouzzolaniques

	20% PVE	30% PVE
1J	77	61
3J	72	64
7J	80	72
28J	89	90
56J	87	88
91J	90	92
180J	89	92
1 an	89	89

4.1.4.2 Résistance à la traction

La Figure 4-3 présente les résistances à la traction des bétons qui contiennent de la PVE.

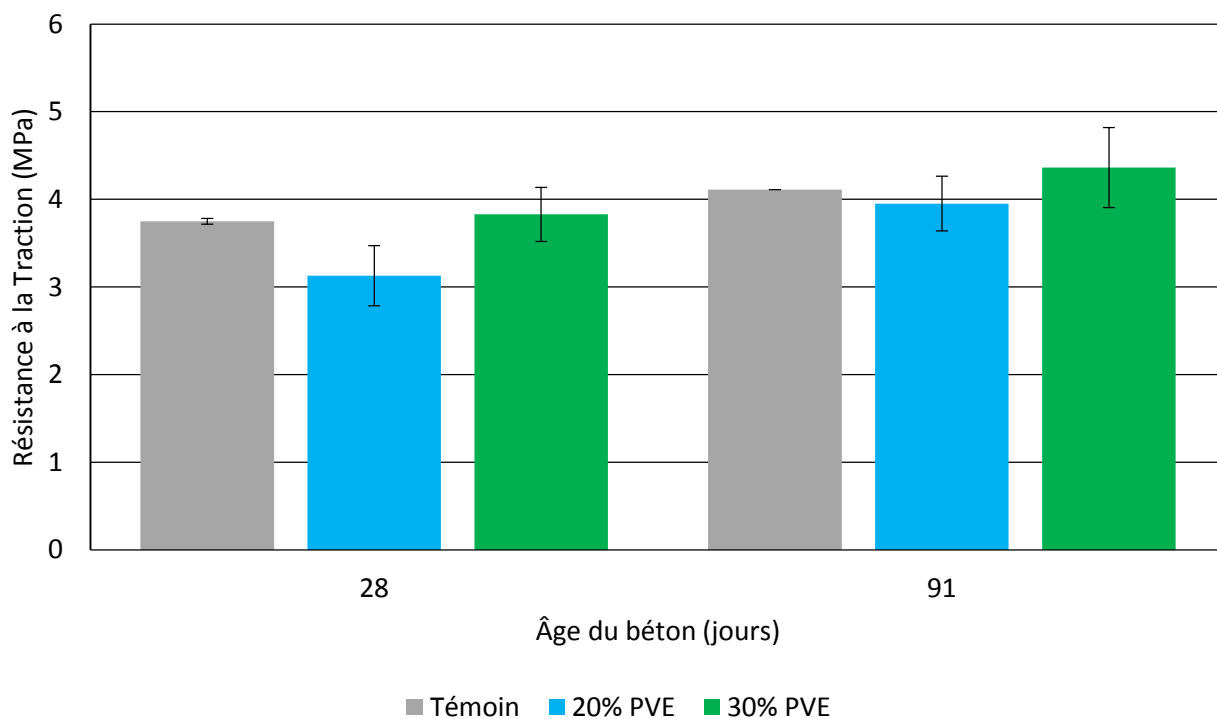


Figure 4-3 : Résistance à la traction de bétons incorporant de la PVE

Les résistances à la traction sont sensiblement pareilles pour les trois types de bétons réalisés et se maintiennent près de 4 MPa. L'ajout de PVE a peu d'influence sur les résultats obtenus par rapport au béton de contrôle. Cependant, il est à noter que les résultats des bétons avec un remplacement de 30% du ciment par la PVE sont légèrement supérieurs à ceux des bétons avec 20% de PVE.

Les résultats entre la PVE et la PV sont similaires, à 28 jours, les bétons incorporant de la PV ont une résistance à la traction de 3 MPa et 2.7 MPa pour 20% et 30% de remplacement respectivement. Les valeurs avec la PVE sont pour 20% de 3.1 et 3.8 pour 30% de remplacement, cet écart peut s'expliquer encore une fois par la différence de ratio E/L où les bétons incorporant de la PV ont un rapport E/L plus élevé, entraînant ainsi une diminution de la résistance à la traction.

Le Tableau 4-7 présente les résistances à la traction estimée des bétons avec PVE. Trois méthodes ont été utilisées, soit CSA, BAEL et ACI. Les valeurs présentées dans le tableau sont calculées à partir des résultats de résistance à la compression réalisés en laboratoire.

Tableau 4-7 Résistance à la traction estimée des bétons incorporant de la PVE

	Âge	Laboratoire	(CSA) $f_t = 0.6\lambda\sqrt{f'_c}$	(BAEL) $f_t = 0.6 + 0.06f'_c$	(ACI) $f_t = 0.59f'_c^{0.55}$
Témoin	28J	3.748	3.297	2.412	3.844
20% PVE	28J	3.128	3.104	2.205	3.597
30% PVE	28J	3.828	3.125	2.228	3.624
Témoin	91J	4.109	3.749	2.943	4.428
20% PVE	91J	3.950	3.559	2.711	4.182
30% PVE	91J	4.364	3.590	2.748	4.221

La méthode ACI s'est avérée être la méthode qui fournit une estimation la plus près des résultats expérimentaux obtenus pour la majorité des cas présentés dans le Tableau 4-7. Seul le cas du 20% PVE à 28 jours de maturité où la méthode CSA est la plus représentative au lieu de la méthode ACI. Dans tous les cas, les résultats expérimentaux et les résultats estimés sont comparables.

4.1.4.3 Résistance en flexion

La Figure 4-4 présente la résistance à la flexion des bétons qui contiennent de la PVE.

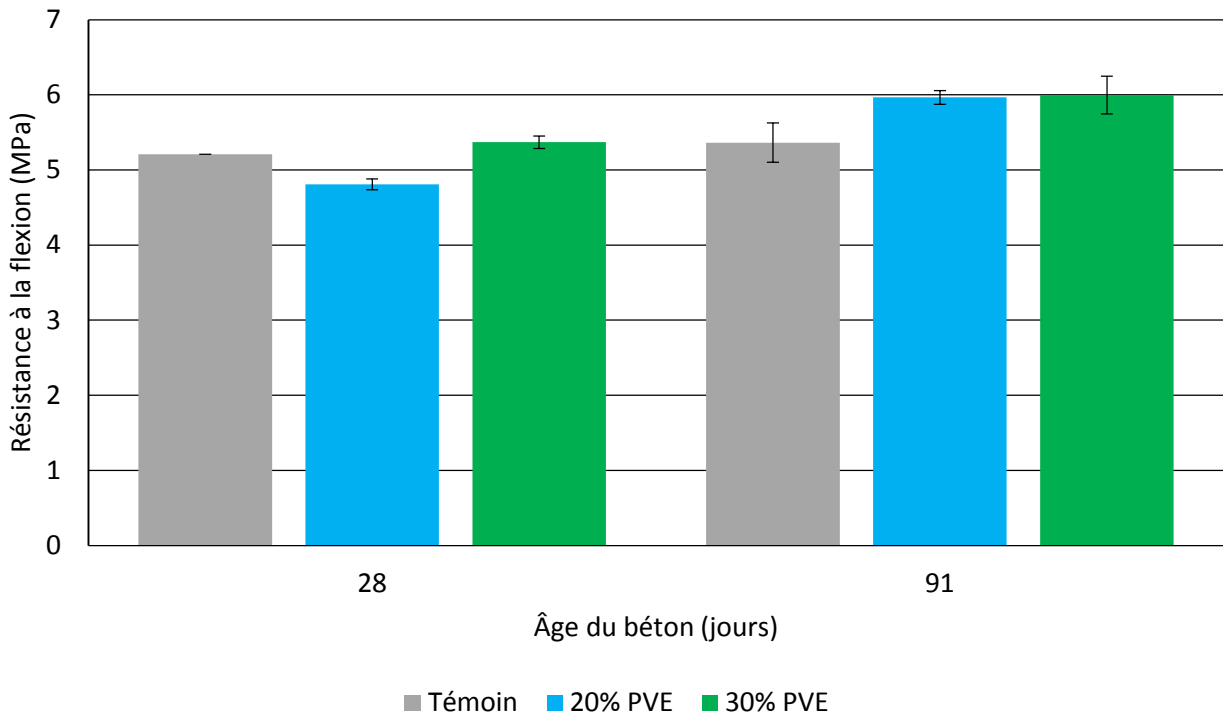


Figure 4-4 : Résistance à la flexion de bétons incorporant la PVE

Tout comme les résistances à la traction, les résultats de résistances à la flexion montrent peu de variances entre le béton de référence et les bétons incorporant de la PVE. À long terme, les bétons avec PVE ont montré des performances légèrement plus élevées que le témoin et il ne semble pas y avoir de différence entre l'utilisation de 20% et de 30% de PVE.

En remplaçant 20% et 30% du ciment par la PV, les résistances à la flexion obtenues sont respectivement de 3,9 et 4,0 MPa à 28 jours. Si l'on compare ces données avec celles de la PVE qui sont de 4,81 et 5,37 MPa, la résistance à la flexion des bétons avec PVE est supérieure d'environ 1 MPa sur leur homologue incorporant de la PV. Ici encore l'écart entre les rapports E/L est la cause probable de cette différence.

Le Tableau 4-8 présente la résistance à la flexion estimée des bétons qui contiennent de la PVE. Il y a deux méthodes pour estimer la résistance en flexion. La première vient de l'ACI, et nécessite de connaître la résistance en compression à l'âge donné et la masse

volumique du béton. La seconde vient de CSA et demande de savoir la résistance en compression du béton à l'âge donné.

$$f_l = g_r \sqrt{w x f'_c} \quad (4.1)$$

$$f_l = 0.6\lambda \sqrt{f'_c} \quad (4.2)$$

Où F'_c = Résistance à la compression
 w = densité du béton (provient de la densité à l'état frais des bétons étudiés)
 g_r = coefficient variant entre 0.012 et 0.02 tel que recommandé par la norme
 λ = coefficient de valeur 1

Tableau 4-8 : Résistance à la flexion estimée des bétons incorporant de la PVE

		Témoin	20% PVE	30% PVE	Témoin	20% PVE	30% PVE
	Âge	28J	28J	28J	91J	91J	91J
	Laboratoire	5.21	4.81	5.37	5.36	5.97	6.00
ACI	gr = 0.012	3.13	2.93	2.99	3.56	3.36	3.43
	gr = 0.013	3.40	3.17	3.24	3.86	3.64	3.72
	gr = 0.015	3.92	3.66	3.73	4.46	4.20	4.29
	gr = 0.018	4.70	4.39	4.48	5.35	5.04	5.15
	gr = 0.02	5.22	4.88	4.98	5.94	5.60	5.72
CSA		3.30	3.10	3.12	3.75	3.56	3.59

Comme le montre le tableau, les résultats estimés sont relativement près des résultats expérimentaux. La formule ACI avec un coefficient g_r de 0,02 est la formule ayant la plus grande correspondance entre les valeurs estimées et expérimentales. Cependant, pour les bétons 30% PVE à 28 jours et 91 jours ainsi que 20% PVE à 91 jours, un écart entre les deux valeurs d'environ 0,35 MPa comparé aux autres résultats est observé. Il est à noter aussi que pour le béton témoin à 91 jours, le coefficient g_r utilisé n'est pas 0,02, mais 0,018.

4.1.4.4 Module d'élasticité

La Figure 4-5 présente le module d'élasticité des bétons qui contiennent de la PVE.

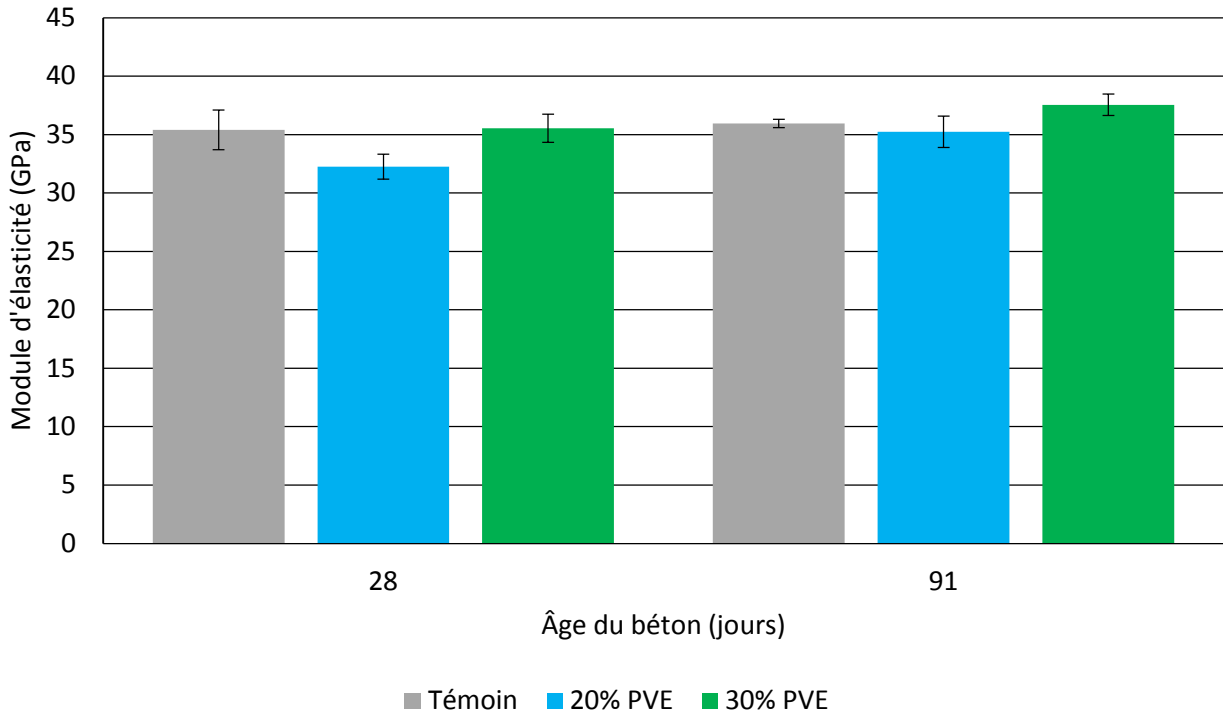


Figure 4-5 : Module d'élasticité de bétons incorporant la PVE

Les tendances présentées dans le tableau précédent sont semblables aux tendances observées avec la résistance à la traction et à la flexion. À 28 jours, le béton contenant 30 % de PVE a développé un module d'élasticité semblable au béton témoin, tandis que le béton 20 % PVE est légèrement inférieur. À 91 jours c'est le béton 20 % PVE qui développe un module d'élasticité similaire au témoin et le béton 30 % PVE a surpassé ce témoin. Lorsqu'on donne un peu de temps aux ajouts cimentaires pour réagir, ces derniers permettent de gagner en résistances.

Encore une fois, lorsque ces données sont comparées avec des bétons confectionnés avec de la PV, la PVE montre des performances supérieures de 5 GPa pour 20 et 30% de remplacement cimentaire à 28 jours. Cet écart est même plus grand lorsque comparé à un âge de 91 jours.

Le Tableau 4-9 présente les modules d'élasticité estimée des bétons qui contiennent de la PVE. Trois méthodes sont utilisées pour estimer le module élastique du béton. La première

est la CSA-23.3 qui utilise la valeur de résistance en compression du béton et sa masse volumique. La seconde est BAEL qui requiert une valeur de résistance en compression. La troisième est la méthode utilisée par l'ACI, qui prend en compte la masse volumique du béton et sa résistance en compression. La masse volumique utilisée est celle à l'état frais pour chaque béton étudié. Les valeurs présentées dans le tableau correspondent aux résistances en compression des carottages. Parmi les trois formules étudiées, BAEL est la plus proche des valeurs obtenues expérimentalement. Puisque ces formules sont basées sur la résistance à la compression, ces résultats nous montrent que le béton a développé une résistance à la compression adéquate pour son module élastique réel puisque les valeurs estimées sont près des valeurs réelles.

Tableau 4-9 : Module d'élasticité estimé des bétons incorporant de la PVE

	Laboratoire	ACI	(CAN3-CSA-23.3-M94)	(BAEL)
		$E = 0.043w^{1.5}\sqrt{f'c}$	$E = (3300\sqrt{f'c} + 6900)\left(\frac{\gamma_c}{2300}\right)^{1.5}$	$E = 11000\sqrt[3]{f'c}$
Témoin 28J	35.40	25.39	22.87	34.25
20PVE 28J	32.25	23.38	21.43	32.90
30PVE 28J	35.55	24.46	22.38	33.05
Témoin 91J	35.95	28.87	25.15	37.32
20PVE 91J	35.25	26.81	23.66	36.05
30PVE 91J	37.55	28.10	24.75	36.25

4.1.5 Essais de durabilité

Les résultats des essais présentés sont également comparés aux résultats des travaux de Zidol. Les résultats de résistance à la compression, de la pénétrabilité des ions chlorure et de la résistivité électriques proviennent des bétons ayant un rapport E/L de 0,50 étudiés dans le cadre d'une campagne d'essais en vue de compléter la fiche technique de la poudre de verre produite par Tricentris (Zidol et Tagnit-Hamou, 2015). Les autres résultats de PV considérée dans notre analyse comparative proviennent des bétons des travaux de (Zidol, 2009) qui ont un rapport E/L de 0,55 alors que les bétons avec PVE ont un rapport E/L de 0,50. Zidol a étudié différents types de PV dans ses travaux de maîtrise.

4.1.5.1 Retrait de séchage

La Figure 4-6 présente le retrait de séchage des bétons qui contiennent de la PVE.

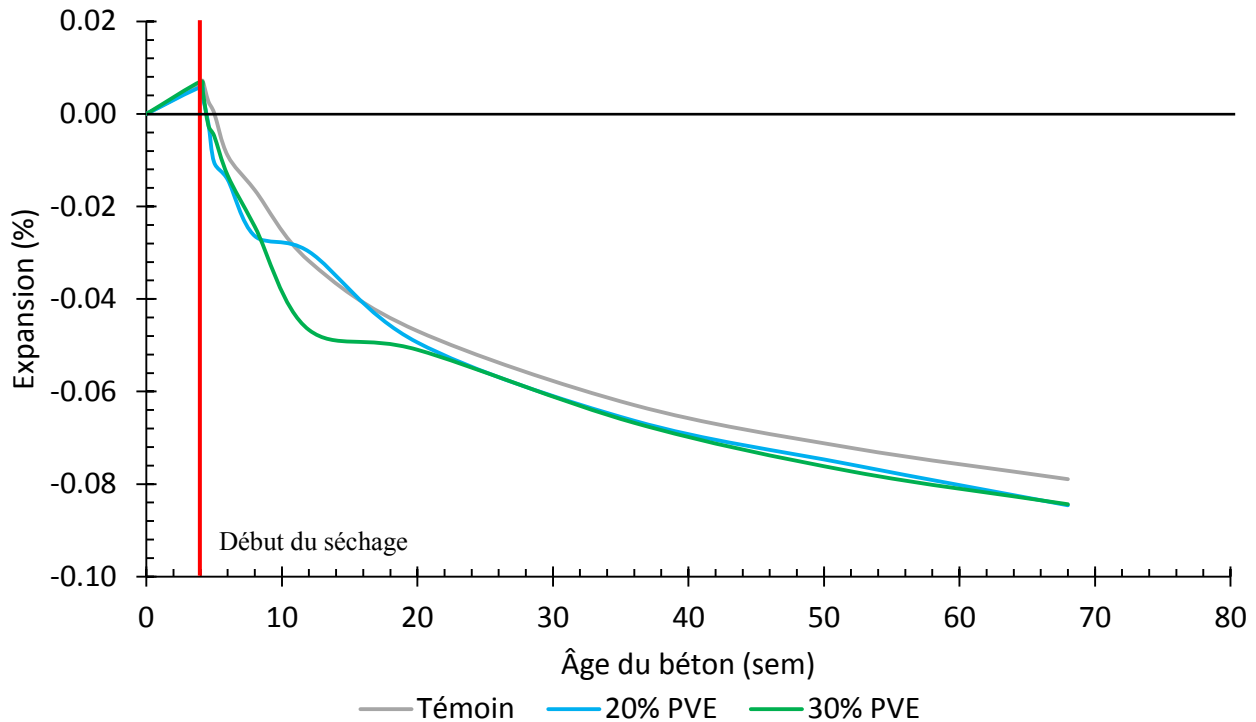


Figure 4-6 : Retrait de séchage de bétons incorporant de la PVE

Il est possible de voir qu'à jeune âge, les courbes ont tendance à varier beaucoup, mais elles se stabilisent autour de la 20^e semaine. Pour le reste de l'essai, il y a peu de variation entre les bétons 20 et 30 % PVE. De plus, ces bétons ont un retrait légèrement supérieur au témoin. À la fin de l'essai, le retrait du témoin est de -0.079 et celui des bétons 20 et 30% PVE sont de -0.085 et -0.084 respectivement. Ces valeurs sont conformes à ce que la norme CSA A3004-E1 qui précise que le retrait de séchage doit être inférieure à 120% de la valeur de référence.

Lorsqu'on compare ces résultats avec des résultats réalisés avec des bétons contenant de la PV, il est possible de remarquer que les bétons avec PV ont un retrait de séchage près de 0,05% après 20 semaines. Les résultats des bétons avec PVE pour ce même intervalle de temps sont de 0.049 et 0.051 pour 20% et 30% de remplacement respectif. Bétons avec PV et PVE ont donc un comportement similaire face au retrait de séchage. Ceci est un aspect confirmant l'hypothèse que la PVE a un comportement similaire à la PV.

4.1.5.2 Résistance aux cycles de gel/dégel

La Figure 4-7 présente les résistances aux cycles de gel/dégel des bétons qui contiennent de la PVE. Les auteurs du livre “Significance of Tests and Properties of Concrete & Concrete-Making Materials” (Nmai, 2006) mentionnent que selon les normes ASTM C260, C494, C1017 les bétons doivent avoir un indice de durabilité de 80 % au moins. Cette valeur est mentionnée afin de s’assurer que les bétons maintiennent de bonnes performances. Cette valeur sera donc utilisée afin de s’assurer que les bétons produits maintiennent un minimum de performances.

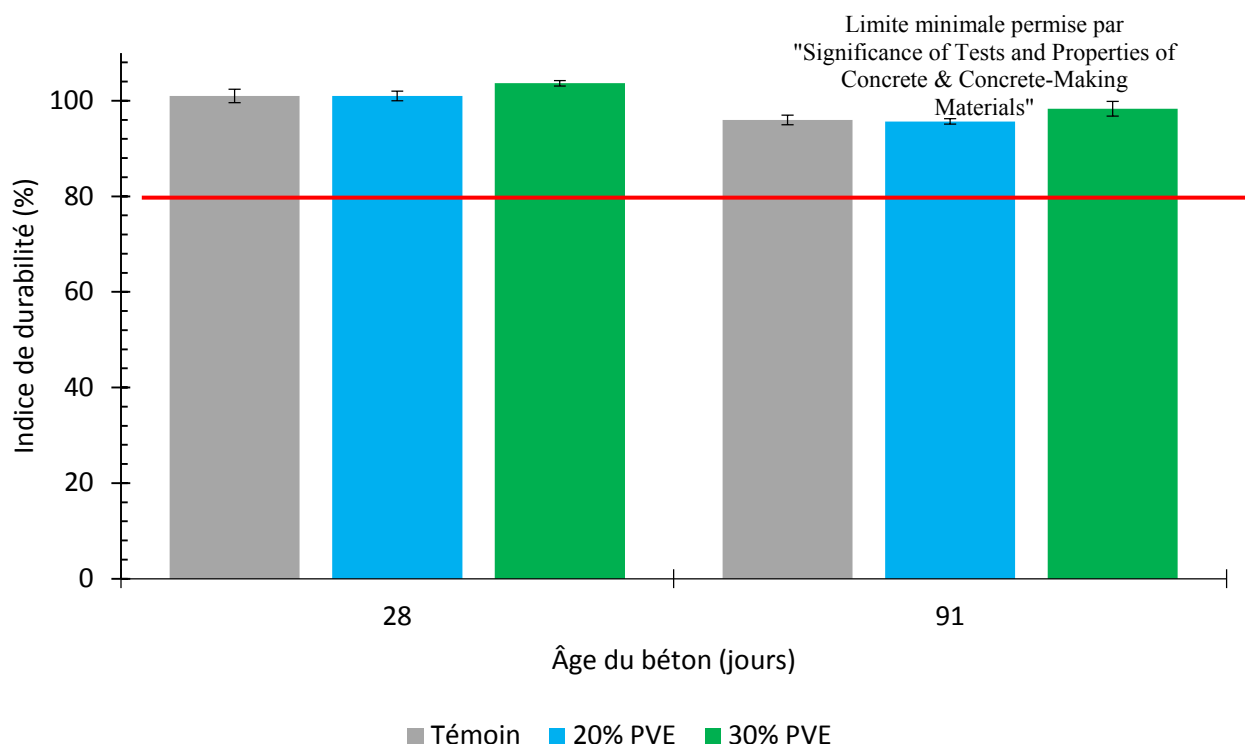


Figure 4-7 : Résistances aux cycles de gel/dégel de bétons incorporant de la PVE

Comme le montre la Figure 4-7, les trois bétons étudiés ont une résistance aux cycles de gel-dégel supérieures à ce que la norme demande. Il n’y a pas de notable entre les résultats obtenus pour ces bétons. La PVE ne nuit donc pas à la résistance aux cycles de gel/dégel du béton.

Il n'y a pas beaucoup de différences entre les résultats obtenus par Zidol sur des bétons contenant de la PV et les bétons incorporant de la PVE. En effet, Zidol a déterminé un facteur de durabilité de 104 et 99 pour 20% et 30% de remplacement par la PV tandis que les résultats de cette étude montrent des résultats de 101 et 103 pour 20 et 30% d'ajout de PVE.

La Figure 4-8 présente des images des bétons étudiés à la fin de l'essai. Il est possible de voir que les bétons sont encore en bon état. De plus, les dommages sont moins apparents lorsque 30% du ciment est remplacé par la PVE suivie de 20% de remplacement. Donc visuellement, l'ajout de PVE a un effet positif par rapport à la résistance aux cycles de gel/dégel.

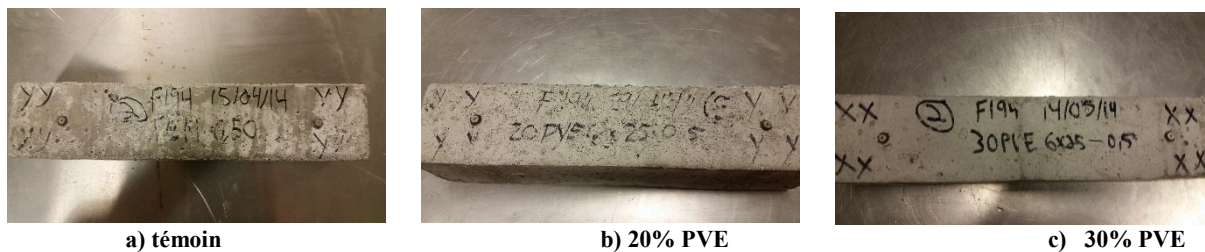


Figure 4-8 : photos des essais de résistances aux cycles de gel/dégel sur des bétons incorporant de la PVE

4.1.5.3 Résistance à l'écaillage

La Figure 4-9 présente la résistance à l'écaillage réalisé selon l'essai ASTM 672 des bétons qui contiennent de la PVE. La Figure 4-10 présente la résistance à l'écaillage réalisé selon l'essai BNQ 2621-900 sur ces mêmes bétons.

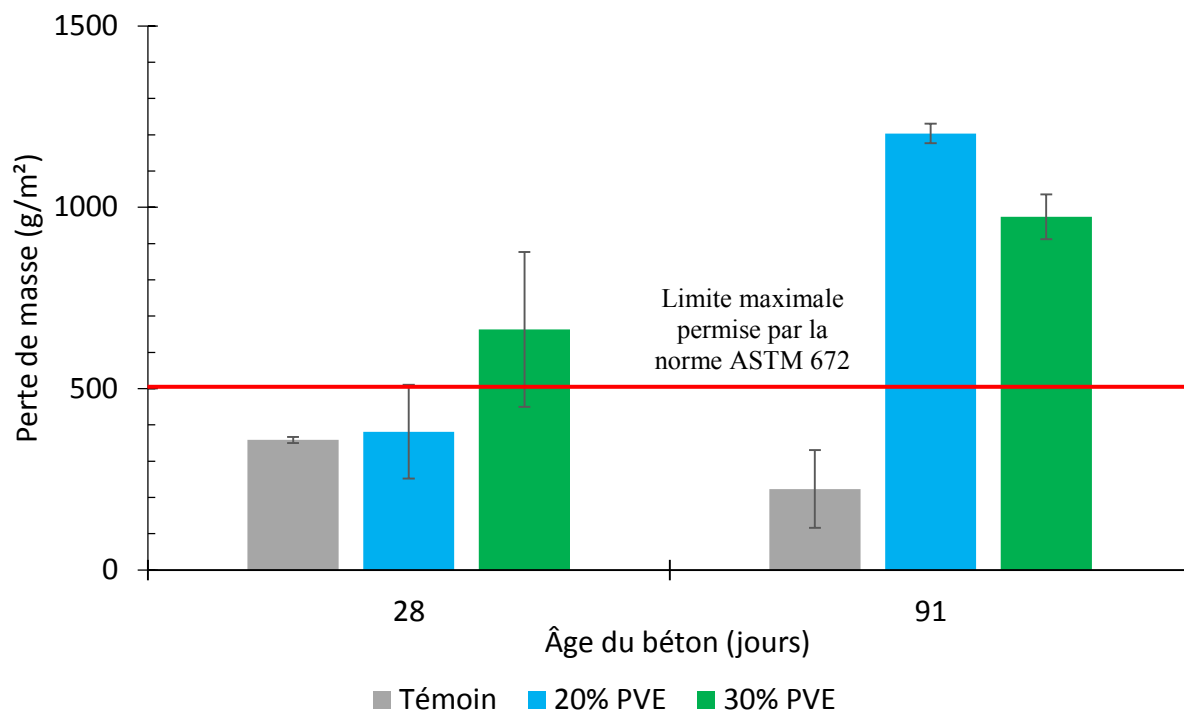


Figure 4-9 : Résistance à l'écaillage ASTM 672 de bétons incorporant de la PVE.

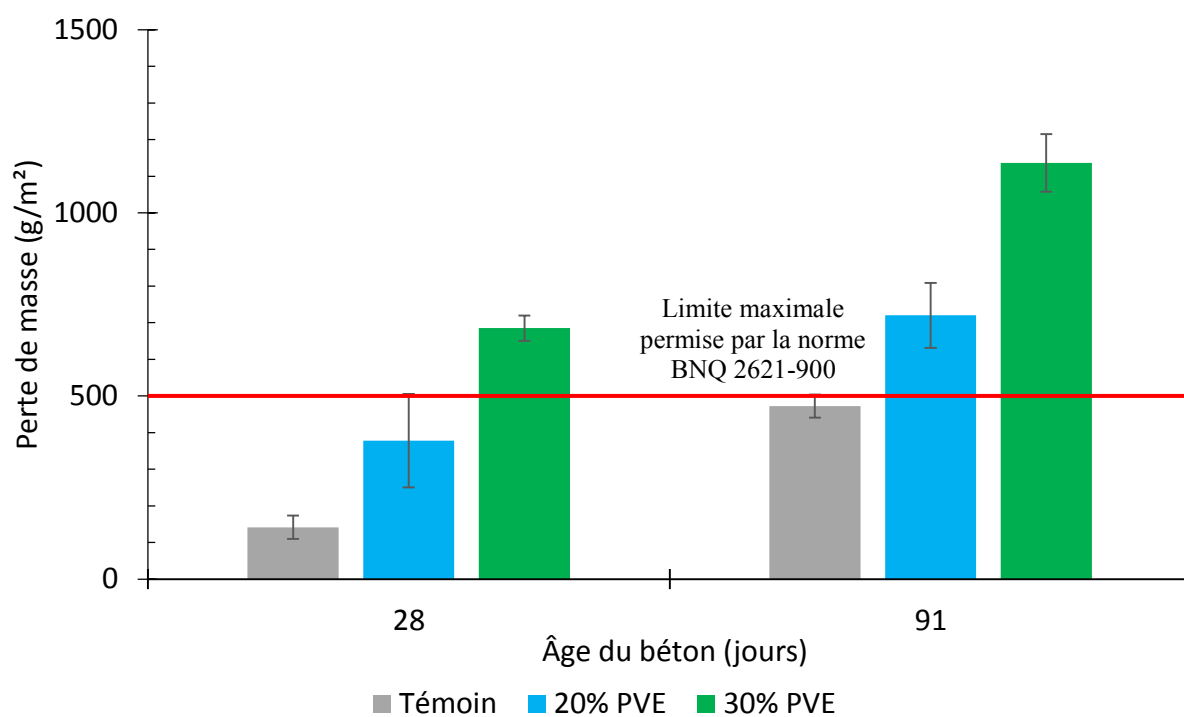


Figure 4-10 : Résistance à l'écaillage BNQ 2621-900 de bétons incorporant de la PVE.

Les précédentes figures montrent des tendances similaires où les bétons incorporant de la PVE ont des pertes de masses plus importantes que le témoin. Ces pertes sont supérieures à ce que la norme demande qui est de 500g/m^2 . Il est à noter que la majorité des pertes de ces bétons se produit dans les 7 premiers cycles. Cela laisse croire que l'ajout de PVE dans le béton crée une zone en surface plus sensible à l'écaillage. Cette dernière est créée suite au ressuage lors de la coulée et du durcissement du béton. Cette observation pourrait également être liée à la finition des plaques lors de l'échantillonnage. Les essais de résistances à l'écaillage ont montré que la PVE génèrent un ressuage plus important. Les résultats des essais réalisés à 91 jours, montrent que les trois bétons présentent des pertes de masse à l'écaillage plus important qu'à un âge de 28 jours. Ce sont des résultats contre-intuitifs, car on s'attend à ce que l'écaillage diminue avec le prolongement de la durée de cure humide puisque le béton gagne en résistance plus son âge avance, due à la densification de la matrice cimentaire et à diminution de la porosité. Cependant, on observe une tendance complètement contre-intuitive qui nécessite des essais supplémentaires pour tenter d'apporter des explications plausibles à ce phénomène.

Les travaux de Zidol sur la PV ont montré que les bétons réalisés avec ce matériau ont une perte de masse de 800 et 933 g/m^2 pour 20 et 30% de remplacement pour un béton d'âge de 28 jours. Pour ces deux cas, l'utilisation de PVE réduit cette quantité de perte. Zidol a trouvé qu'à 91 jours, 30% de remplacement du ciment par la PV a une perte de masse due à l'écaillage de 1845g/m^2 , ce qui est largement supérieur à la norme et même plus de 500g/m^2 que 30% de PVE. Cependant, cela peut être dû encore une fois au fait que le rapport E/L des travaux de Zidol est de 0,55 alors que pour les bétons de PVE un rapport de 0,50 a été utilisé. Un rapport E/L plus élevé entraîne une plus grande perte de masse due au fait que la matrice cimentaire n'est pas aussi dense et que la porosité du béton est plus élevée.

Le Tableau 4-10 présente un résumé des classes d'évaluations visuelles des bétons soumis au test de résistance à l'écaillage. À la suite de ce tableau se trouve l'évaluation visuelle des bétons de PVE situées dans le Tableau 4-11.

Tableau 4-10 : Critère d'évaluation visuelle pour l'essai de résistance à l'écaillage
Critère d'évaluation visuelle :

ASTM 672	BNQ 2621-900
0 = Aucun écaillage	0 = Aucun écaillage
1 = Très léger (3 mm Max. aucun granulat)	1a = Très léger, absence de cratères (pop outs)
2 = Léger à modérer	1b = Important, absence de cratères (pop outs)
3 = Modérer (quelques granulats)	2a = Aucun, présence de quelques cratères (pop outs)
4 = Modérer à sévère	2b = Aucun, présence de plusieurs cratères (pop outs)
5 = Sévère (granulats sur toute la surface)	3 = Mortier de surface écaillé avec de gros granulats éclatés
	4 = Gros granulats éclatés avec mortier de surface écaillé

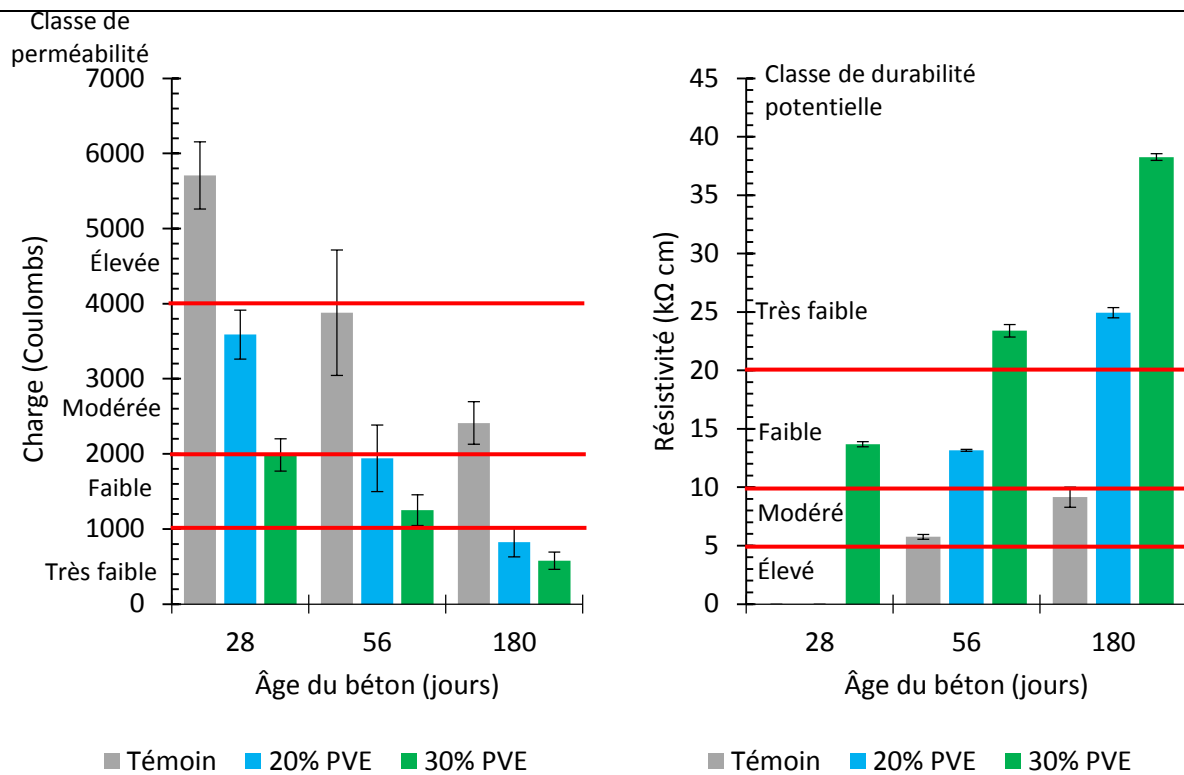
Tableau 4-11 : Évaluation visuelle de la résistance à l'écaillage des bétons incorporant de la PVE

Évaluation visuelle	ASTM 672		BNQ 2621-900	
	28 jours	91 jours	28 jours	91 jours
Témoin	1	1	1a	1a
20% PVE	1	2	1a	1a
30% PVE	2	2	1a	1a

L'évaluation ASTM montre que le témoin a subi un écaillage très léger alors qu'à 91 jours les bétons incorporant de la PVE ont été évalués à un écaillage léger à modérer. Lorsque cet essai est réalisé selon la norme BNQ, il n'y a pas de différence notable dans l'évaluation visuelle, tous les échantillons sont classés comme ayant un écaillage très léger avec une absence de cratères.

4.1.5.4 Pénétrabilité des ions chlorure et résistivité électrique

La Figure 4-11 présente la pénétrabilité des ions chlorure (a) et la résistivité électrique (b) des bétons qui contiennent de la PVE. Les résultats de ces deux essais sont présentés en même temps, car les résultats de ces essais donnent des indications sur la capacité du béton à contrôler les transferts ioniques, ce qui revient à une capacité de contrôle de la réaction de corrosion qui se forme dans les bétons armés.



(a) perméabilité aux ions chlorure (b) résistivité électrique
 Figure 4-11 : Perméabilité aux ions chlore et résistivité électrique des bétons contenant de la PVE

Comme le montrent la figure ci-dessus, il est possible de noter qu'il y a de grandes différences entre les trois bétons étudiés. Pour les deux essais, ces bétons se retrouvent dans la classe de perméabilité/risque de corrosion équivalente. Le principal effet que l'on peut voir sur ces graphiques indique que l'utilisation de la PVE a une grande influence sur la diminution de la perméabilité ce qui revient à une diminution du risque de corrosion. À 28 jours l'utilisation de 20% de PVE permet de réduire de 37% la perméabilité alors que pour 30% de PVE il y a 65 % de diminution de la perméabilité, ce qui classe ce béton dans la catégorie faible perméabilité. Cet effet est plus marqué sur les échéances subséquentes étudiées et se note tant sur l'essai de pénétrabilité des ions chlorure que sur l'essai de résistivité électrique. L'augmentation marquée de la résistivité électrique est due à la réaction pouzzolanique et à la densification de la matrice cimentaire réduisant la dimension des pores et leurs connectivités rendant ainsi plus difficile le transfert d'ions et d'éléments potentiellement vulnérables pour la durabilité du béton.

Il est possible de comparer les résultats de pénétrabilité des ions chlorure des bétons avec PVE et PV à 28 jours. Il semble que 20% de PV (3371 coulombs) à 28 jours et que 20% de PVE (3588 coulombs) se classe tous les deux dans la catégorie modérée qui se situe à une

charge entre 2000 et 4000 coulombs. À 56 jours, le béton 30% de PV (1934 coulombs), celui-ci se situe dans la section à perméabilité faible et 30% de PVE (1986 coulombs) se situent dans la même classe de perméabilité. On peut donc en conclure qu'en ce qui concerne la perméabilité aux chlorures, la PVE a un comportement similaire à la PV. On observe une tendance similaire pour l'essai de résistivité électrique suggérant que les bétons se classent dans la même catégorie de risque.

4.1.5.5 Résistance à la réaction alcalis-granulats sur béton

La Figure 4-12 présente l'expansion causée par la RAG des bétons qui contiennent de la PVE.

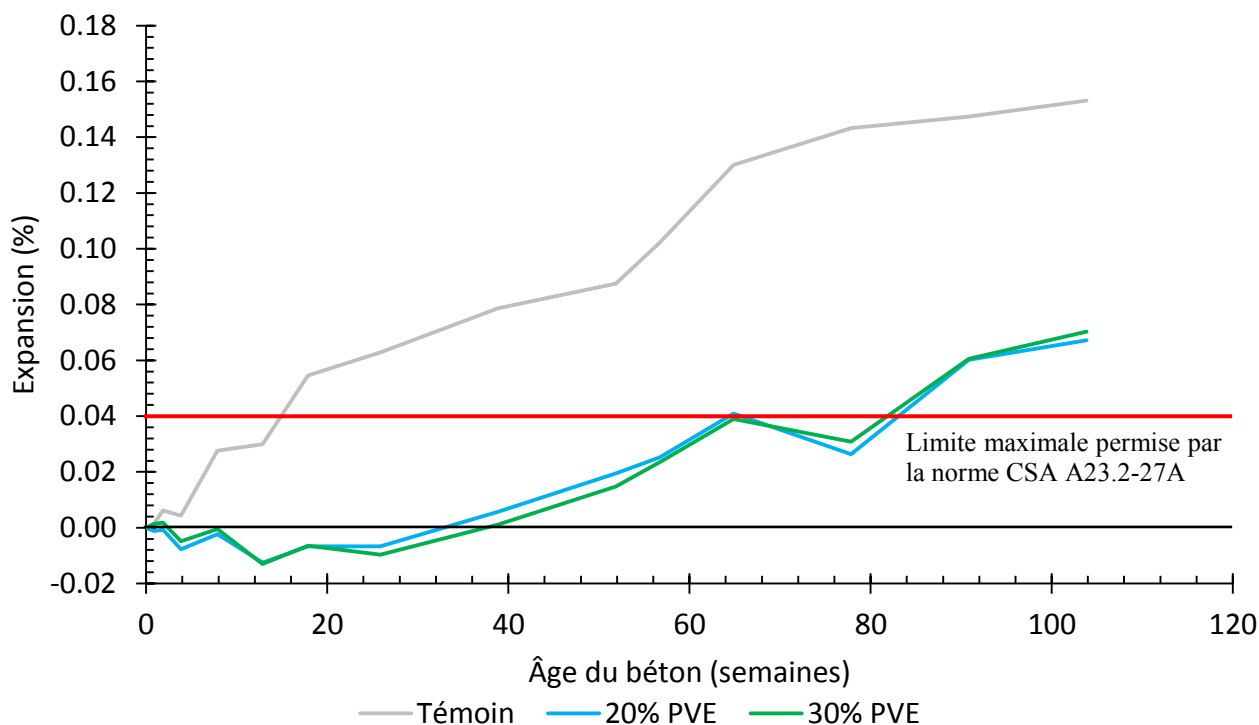


Figure 4-12 : Expansion causée par la RAG de bétons incorporant de la PVE

Les courbes présentées ci-dessus montrent un écart important entre le béton de référence et les bétons contenant des ajouts cimentaires. En effet, ces derniers ont développé une expansion plus faible que leur contrepartie ne contenant pas d'ajouts cimentaires. De plus, il ne semble pas y avoir beaucoup de différence entre le remplacement de 20 % ou de 30 % du ciment par la PVE. L'expansion plus faible des bétons avec ajouts provient de la réaction pouzzolanique et l'effet de remplissage des ajouts cimentaire, qui densifie la matrice

cimentaire et diminue à grosseur des pores ainsi que leur connectivité réduisant la perméabilité du béton comme montré à la section 4.1.4.4. Au terme de l'essai, les bétons de 20 et 30 % PVE ont permis de réduire l'expansion due à la RAG de façon considérable. Les taux de réduction de l'expansion sont présentés au Tableau 4-12 pour les bétons avec PVE et PV. Bien qu'il y ait eu une réduction significative (56 % et 54 % pour 20 et 30% de PVE), ces mélanges ont dépassé la limite maximale d'expansion permise par la norme CSA A23.2-27A qui exige un maximum de 0,04 % d'expansion après deux ans (104 semaines) d'exposition. Il est donc possible d'en conclure que l'utilisation de la PVE dans les bétons permet de réduire l'expansion causée par la RAG, mais qu'elle n'est pas suffisante pour la contrer à elle seule. Les résultats obtenus dans cette étude sont contradictoires avec l'étude de (Chen et al., 2006). Ces auteurs ont trouvé que le verre électronique qu'ils utilisent n'engendre pas de RAG. Cette différence entre les résultats peut être expliquée par la différence entre la composition de leur verre, qui contient peu d'alcalis (0,8 %) alors que celui utilisé par l'université de Sherbrooke en contient 12,59 %.

Tableau 4-12 : Réduction de l'expansion due à la RAG par rapport au témoin

Nom du mélange	104 semaines
20% PVE	56,1%
30% PVE	54,1%
20% PV	32,3%
30% PV	44,5%

Les résultats obtenus par Zidol sur la résistance à la RAS des bétons qui contiennent de la PV ont montré que les bétons incorporant 20 et 30 % permettent de réduire l'expansion due à la RAG comme le montre les valeurs du Tableau 4-12. Les taux de réduction de l'expansion sont calculés au terme de l'essai selon la norme CSA A23.2-14A, soit 2 ans d'expositions. L'utilisation de la PV et de la PVE ont tous deux permis de réduire l'expansion causée par la RAG comparée à un béton de référence. Cependant, la PVE a permis une réduction plus importante que la PV. De plus, lorsque la PV est utilisée, il y a une différence importante entre un remplacement de 20 % ou de 30 %, où 30 % de PV offre de meilleurs résultats. Ce phénomène n'a pas été observé pour la PVE, où il n'y a pas de différence notable entre un taux de remplacement de 20 % ou 30 %. Comme présenté à la section 4.1.4.1, les bétons de

PVE semblent développer plus de retrait de séchage. Ce retrait supplémentaire pourrait expliquer en partie cette réduction de l'expansion plus importante.

Malgré des réductions importantes de l'expansion causée par la RAG, les deux matériaux étudiés ne respectent pas les critères de la norme CSA A23.2-27A qui demande une expansion inférieure à 0,04 % après deux ans d'exposition. Une des hypothèses pour l'étude la PVE est que cette dernière va avoir un comportement semblable à la PV. Au niveau de la norme, cette hypothèse est respectée puisque les deux matériaux réduisent l'expansion, mais ce n'est pas suffisant pour être conforme aux exigences. Cependant si l'on se concentre sur les performances du matériau, soit le taux de réduction de l'expansion et l'effet du taux de remplacement dans la matrice cimentaire, on observe des comportements différents, donc de ce point de vue cette hypothèse n'est pas respectée.

4.1.5.6 Essai accéléré de carbonatation

La Figure 4-13 présente la profondeur de carbonatation des bétons qui contiennent de la PVE.

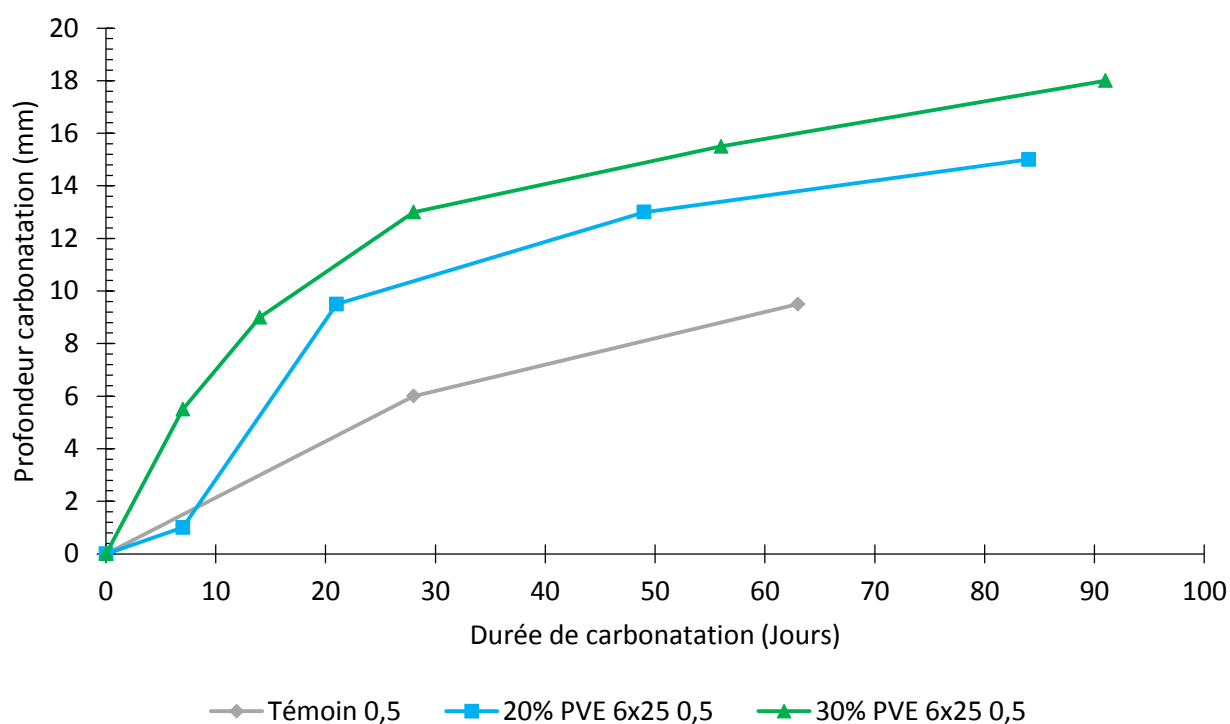


Figure 4-13 : Profondeur de carbonatation de bétons incorporant de la PVE

Les bétons incorporant de la PVE ont une profondeur de carbonatation plus grande que le témoin. Le béton avec 30% de remplacement du ciment par la PVE a une profondeur de carbonatation plus élevée que celui qui en contient 20%. L'essai de carbonatation mesure la neutralisation du pH en fonction de la profondeur dans l'échantillon. Cette neutralisation se produit entre le $\text{Ca}(\text{HO})_2$ et les ions H^+ se diffusant dans la solution interstitielle. Comme les bétons contiennent moins de $\text{Ca}(\text{HO})_2$, du à une plus faible quantité de ciment ainsi qu'à la consommation du $\text{Ca}(\text{HO})_2$ par la PVE pour former de nouveaux CSH, les ions H^+ vont donc pénétrer plus loin, plus rapidement que dans le béton témoin pour neutraliser la même quantité de $\text{Ca}(\text{OH})_2$. Bien que les résultats montrent une profondeur de carbonatation soit plus profonde pour les bétons avec ajouts cimentaires, ils ne sont pas nécessairement plus à risque, car leur perméabilité est très faible par rapport au témoin. Zidol a fait des observations similaires sur des bétons contenant de la PV.

La Figure 4-14 présente des images des bétons pendant l'essai de carbonatation.

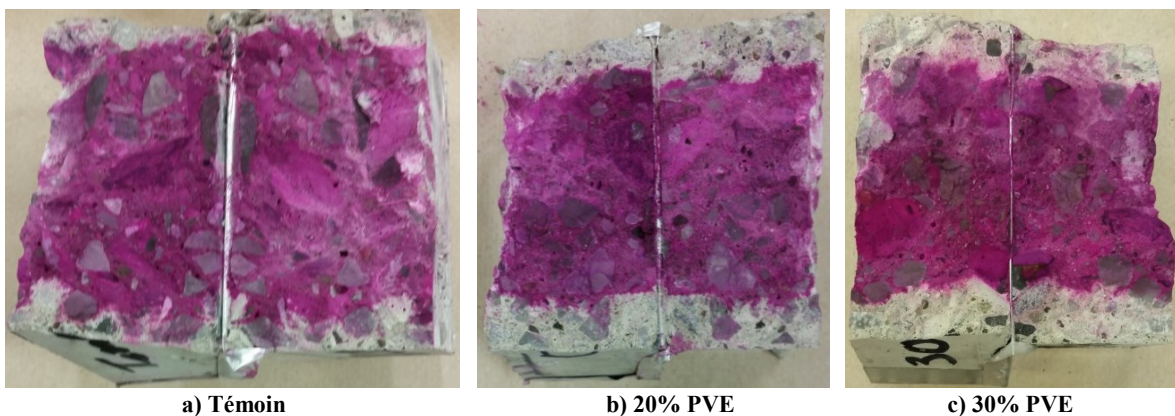


Figure 4-14 : Carbonatation des bétons incorporant de la PVE

La partie en rose montre le béton qui n'a pas été attaqué par la carbonatation. Il est possible de voir que le témoin a une profondeur d'attaque plus faible que les bétons avec PVE, ce qui concorde avec les graphiques.

4.1.5.7 Réseau d'air dans le béton durci

Les caractéristiques du réseau de bulles d'air des bétons durcis incorporant de la PVE sont présentées au Tableau 4-13 et schématisées sur la Figure 4-15 et la Figure 4-16. La perte d'air sur le béton durci varie en 2,9 et 3,2 %. Le développement d'un bon réseau explique bien les comportements observés avec l'essai de pénétrabilité des ions chlorure, la résistivité électrique, la résistance au gel-dégel. Le facteur d'espacement \bar{L} est inférieur à 230 μm . Ces

caractéristiques montrent que les réseaux d'air à l'état durci des bétons étudiés sont aptes à résister aux cycles de gel-dégel.

Les résultats des travaux de Zidol portant sur les bétons incorporant de la PV montrent que la surface spécifique des bulles est similaire à entre les bétons incorporant de la PV et ceux incorporant de la PVE. Pour ce qui est du L bar, 20 et 30% de remplacement cimentaire ont un facteur d'espacement respectif de 201 et 210 μm , ce qui est légèrement supérieur aux résultats obtenus avec la PVE, mais ils restent inférieurs à la limite qui est de 230 μm

Tableau 4-13 : Caractéristiques du réseau de bulles d'air des bétons avec PVE

Caractéristiques	Témoin	20 PVE	30 PVE
Teneur en air à l'état frais (%)	8.6	9.2	7.3
Teneur en air à l'état durci (%)	5.7	6.3	4.1
Surface spécifique α (1/mm)	26.7	26.9	29.9
Facteur d'espacement \bar{L} (μm)	181	168	184

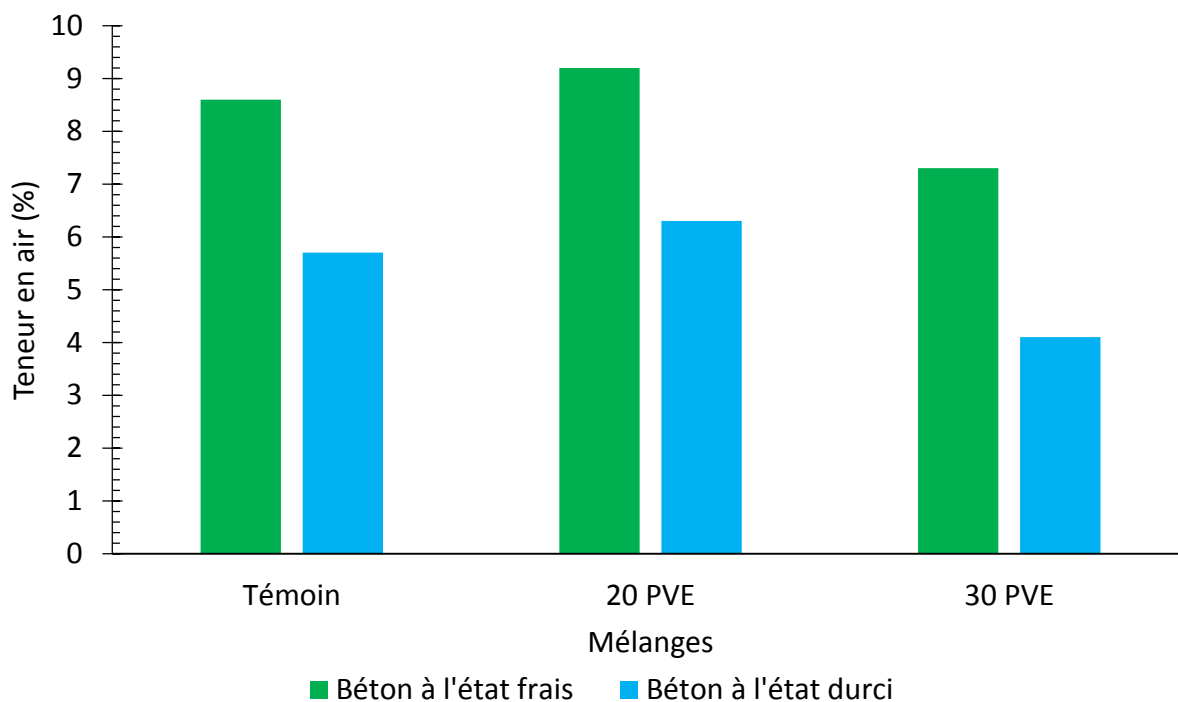


Figure 4-15 : Comparaison de la teneur en air à l'état frais et durci des bétons incorporant de la PVE

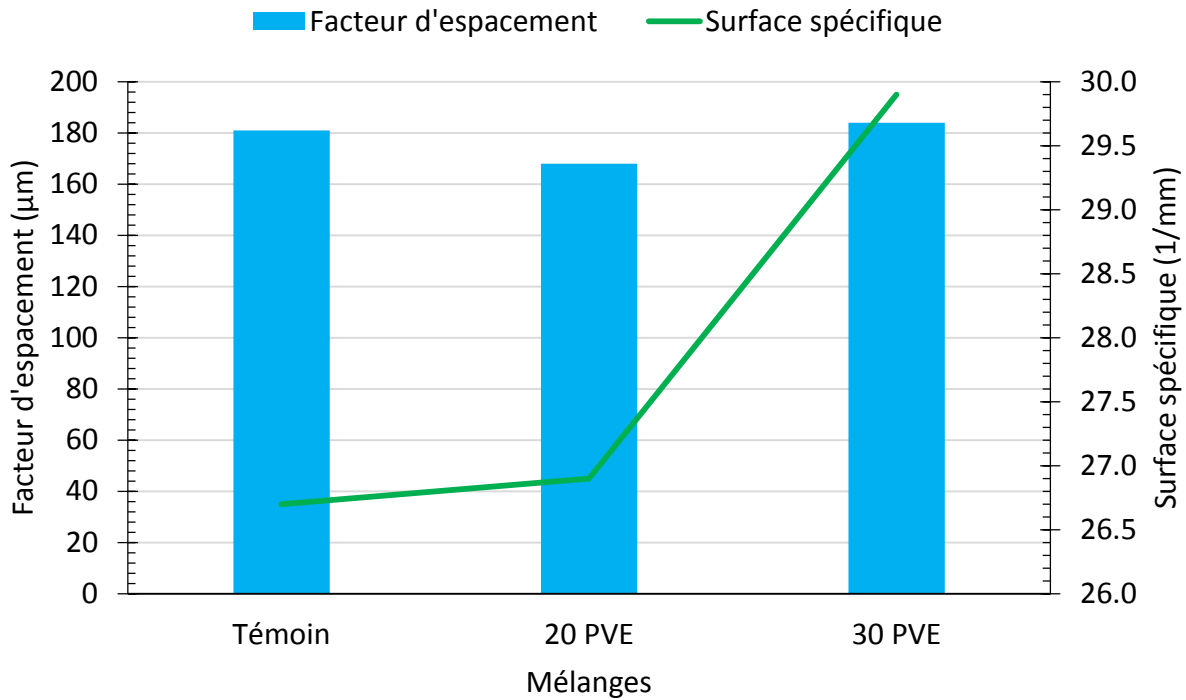


Figure 4-16 : Facteur d'espacement et surface spécifique des bulles d'air dans les bétons contenant de la PVE

4.1.6 Conclusion partielle

Au vu des résultats présentés dans ce mémoire, il est possible de voir que l'utilisation de la PVE a du potentiel en tant qu'ajout cimentaire dans le béton. Le Tableau 4-14 présente une synthèse des essais réalisés sous forme d'un tableau comparatif entre les bétons 20%, 30% PVE et le béton de contrôle. Ces mélanges sont présentés à l'aide d'indicateurs « = », « + », et « - ». Ce système a pour but d'indiquer rapidement dans quels essais la PVE s'est montrée efficace ou non par rapport au témoin. Les détails de la classification sont présentés au Tableau 4-15. Selon ce tableau, la majorité des essais montre que la PVE a une influence bénéfique ou ne nuit pas aux performances du béton. Cependant, il faut porter une attention particulière à la résistance à l'écaillage qui a montré une faiblesse importante nécessitant des études supplémentaires. Il faut aussi porter attention à la RAG dans les bétons contenant de la PVE, car bien que cette dernière a permis de réduire l'expansion de plus de 50%, cette dernière est supérieure à ce que la norme permet. De plus, les essais à l'état frais ont montré qu'il y a probablement une interaction entre la PVE et les adjuvants utilisés surtout au niveau de l'affaissement et de la teneur en air. Des essais supplémentaires doivent être réalisés pour bien identifier cette interaction.

Tableau 4-14 : Synthèse des résultats des essais sur bétons incorporant de la PVE

Essais	20% PVE	30% PVE
Dosage en adjuvants	+	+
Affaissement	+	+
Teneur en air	=	=
Masse volumique	=	=
Température	=	=
Résistance à la compression	-	-
Résistance à la traction	=	=
Résistance à la flexion	=	=
Module d'élasticité	=	=
Retrait de séchage	=	=
Résistance aux cycles de gel-dégel	=	=
Résistance à l'écaillage	--	--
Perméabilité aux ions chlorures	++	++
Résistivité électrique	++	++
Résistances à la réaction alcalis granulat	+	+
Carbonatation	-	-

Tableau 4-15 : Légende du tableau de synthèse

--	Performances inférieures au témoin
-	Performances légèrement inférieures au témoin
=	Performances similaires au témoin
+	Performances légèrement supérieures au témoin
++	Performances supérieures au témoin

Une des principales hypothèses apportées pour l'utilisation de la PVE en tant que remplacement cimentaire est que cette dernière aurait un comportement similaire à la PV due à sa composition chimique similaire. Suite aux résultats présentés dans ce chapitre, on remarque un comportement similaire entre la PVE et la PV pour certains des essais réalisés alors que pour d'autres essais l'utilisation de PVE a montré de meilleures ou pires performances que si l'on utilise la PV. Les résultats des essais de la résistance à la compression, la résistance aux cycles de gel/dégel, la résistance à l'écaillage, la pénétrabilité des ions chlorure, la résistivité

électrique, le réseau d'air la résistance à la carbonatation et la résistance à la réaction alcalis silice, nous montre un comportement similaire entre ces deux matériaux. Les données obtenues pour les essais de résistance à la traction, la résistance à la flexion, le module d'élasticité ont montré de meilleures performances de la PVE alors que les résultats de retrait de séchage ont montré une performance moindre de la PVE par rapport à la PV.

Tableau 4-17 : Formulation des mortiers réalisés avec du ciment GU à faible teneur en alcalis

	100GUFA	70GUFA- 30CV	70GUA- 20CV-10PV	89GUFA- 11MK	65GUFA- 5MK-30CV	75GUFA- 5MK-20PV
Rapport E/L	0.47	0.47	0.47	0.47	0.47	0.47
Eau	206.80 g	206.80 g	206.80 g	206.80 g	206.80 g	206.80 g
Ciment GU à faible teneur en alcalis (GUFA)	440.00 g	308.00 g	308.00 g	391.60 g	286.00 g	330.00 g
Cendres volantes (CV)	0.00 g	132.00 g	88.00 g	0.00 g	132.00 g	0.00 g
Métakaolin (MK)	0.00 g	0.00 g	0.00 g	48.40 g	22.00 g	22.00 g
Poudre de verre (PV)	0.00 g	0.00 g	44.00 g	0.00 g	0.00 g	88.00 g
Sable verre retenu sur le tamis 2.36mm	99.00 g	99.00 g	99.00 g	99.00 g	99.00 g	99.00 g
Sable verre retenu sur le tamis 1.18mm	247.50 g	247.50 g	247.50 g	247.50 g	247.50 g	247.50 g
Sable verre retenu sur le tamis 600um	247.50 g	247.50 g	247.50 g	247.50 g	247.50 g	247.50 g
Sable verre retenu sur le tamis 300um	247.50 g	247.50 g	247.50 g	247.50 g	247.50 g	247.50 g
Sable verre retenu sur le tamis 150um	148.50 g	148.50 g	148.50 g	148.50 g	148.50 g	148.50 g

Tableau 4-18 : Formulation des mortiers réalisés avec du ciment blanc

	100CB	89CB11MK	62CB-8MK-30PV
Rapport E/L	0.47	0.47	0.47
Eau	206.80 g	206.80 g	206.80 g
Ciment Blanc (CB)	440.00 g	391.60 g	272.80 g
Métakaolin (MK)	0.00 g	48.40 g	35.20 g
Poudre de verre (PV)	0.00 g	0.00 g	132.00 g
Sable verre retenu sur le tamis 2.36mm	99.00 g	99.00 g	99.00 g
Sable verre retenu sur le tamis 1.18mm	247.50 g	247.50 g	247.50 g
Sable verre retenu sur le tamis 600um	247.50 g	247.50 g	247.50 g
Sable verre retenu sur le tamis 300um	247.50 g	247.50 g	247.50 g
Sable verre retenu sur le tamis 150um	148.50 g	148.50 g	148.50 g

Tableau 4-19 : Formulation des mortiers réalisés avec 70% de sable de verre.

	Tem 70GV-SB	30CV 70GV-SB
Rapport E/L	0.47	0.47
Eau	206.80 g	206.80 g
Ciment GU à faible teneur en alcalis (GUFA)	440.00 g	308.00 g
Cendres volantes (CV)	0.00 g	132.00 g
Sable verre retenu sur le tamis 2.36mm	69.30 g	69.30 g
Sable béton retenu sur le tamis 2.36mm	29.70 g	29.70 g
Sable verre retenu sur le tamis 1.18mm	173.25 g	173.25 g
Sable béton retenu sur le tamis 1.18mm	74.25 g	74.25 g
Sable verre retenu sur le tamis 600um	173.25 g	173.25 g
Sable béton retenu sur le tamis 600um	74.25 g	74.25 g
Sable verre retenu sur le tamis 300um	173.25 g	173.25 g
Sable béton retenu sur le tamis 300um	74.25 g	74.25 g
Sable verre retenu sur le tamis 150um	103.95 g	103.95 g
Sable béton retenu sur le tamis 150um	44.55 g	44.55 g

4.2.1.2 Essais de résistances à la RAS

Puisqu'une grande quantité de mortiers ont été réalisés, les résultats sont présentés selon le type de ciment utilisé. La Figure 4-17 présente donc les résultats pour les mortiers réalisés avec du ciment type GU, la Figure 4-18 présente les résultats des mortiers contenant du ciment type GU à faible teneur en alcalis et la Figure 4-19 présente les résultats pour les mortiers fabriqués avec du ciment blanc.

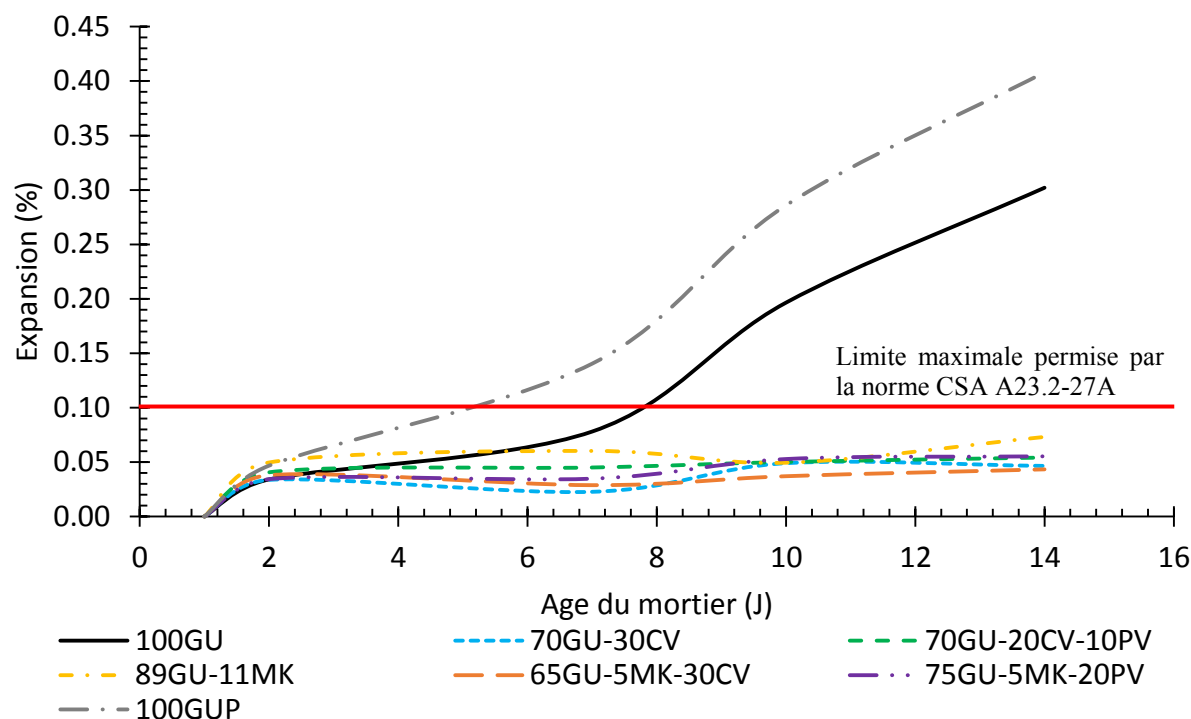


Figure 4-17 : RAS mortier avec ciment type GU

Comme le montre la Figure 4-17, les mortiers de référence 100 % ciment GU et GU pale, présentent des expansions qui dépassent la limite d'expansion permise de 0,15 % à 14 jours selon la norme CSA A23.2 27A, mais tous les mélanges avec ajout cimentaires développent des expansions nettement inférieures à cette limite. Cependant, il est possible de voir que l'expansion du mélange avec 11 % de métakaolin (89GU-11MK) tend à augmenter vers la fin de la période d'essai. Il est à noter que les mélanges avec les plus faibles expansions sont 70GU-30CV et 65GU-5MK-30CV avec des expansions respectives de 0,0465 et 0,0433 à 14 jours. Les mélanges incorporant de la poudre de verre se situent près de ces mélanges ayant de faibles expansions avec des expansions de 0.0541 pour le mélange 70GU-20CV-10PV et 0.0553 pour le mélange 75GU-5MK-20PV.

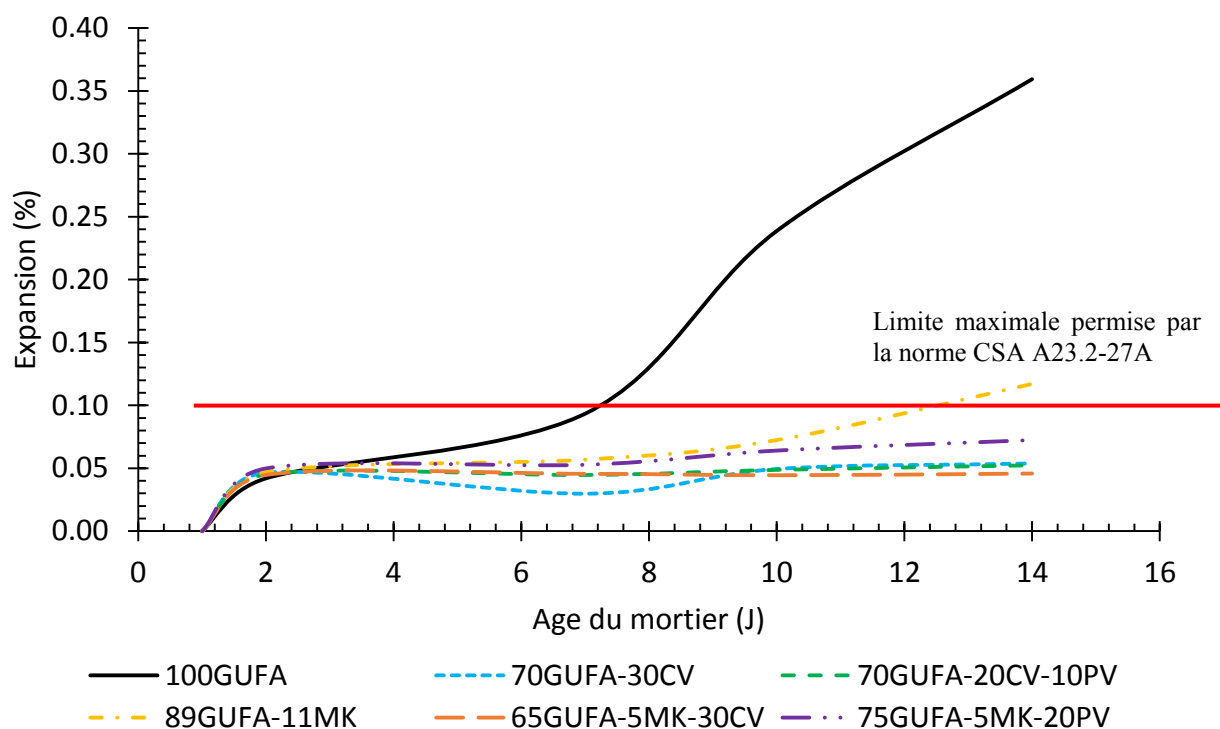


Figure 4-18 : RAS mortiers avec ciment GU faible alcalis

L'utilisation du ciment de type GU à faible teneur en alcalis développe une expansion importante dans le mélange témoin, qui dépasse la limite de 0,10 % d'expansion après seulement 7 jours d'exposition. Il est à noter qu'à 14 jours les mélanges 70GUFA-30CV, 70GUFA-20CV10PV et 65GUFA-5MK-30CV ont développé des expansions les plus faibles et qui sont similaires avec des expansions respectives de 0.0538, 0.0523 et 0.0458. Une autre observation est l'expansion du mélange 89GUFA-11MK qui jusqu'à 7 jours montre des tendances similaires à celles des autres mélanges avec ajouts cimentaires. Cependant entre 7 jours et 14 jours il y a eu une augmentation importante du taux d'expansion ce qui fait qu'à la période de mesure de 14 jours, ce mortier a une expansion supérieure à la limite de 0,10 %.

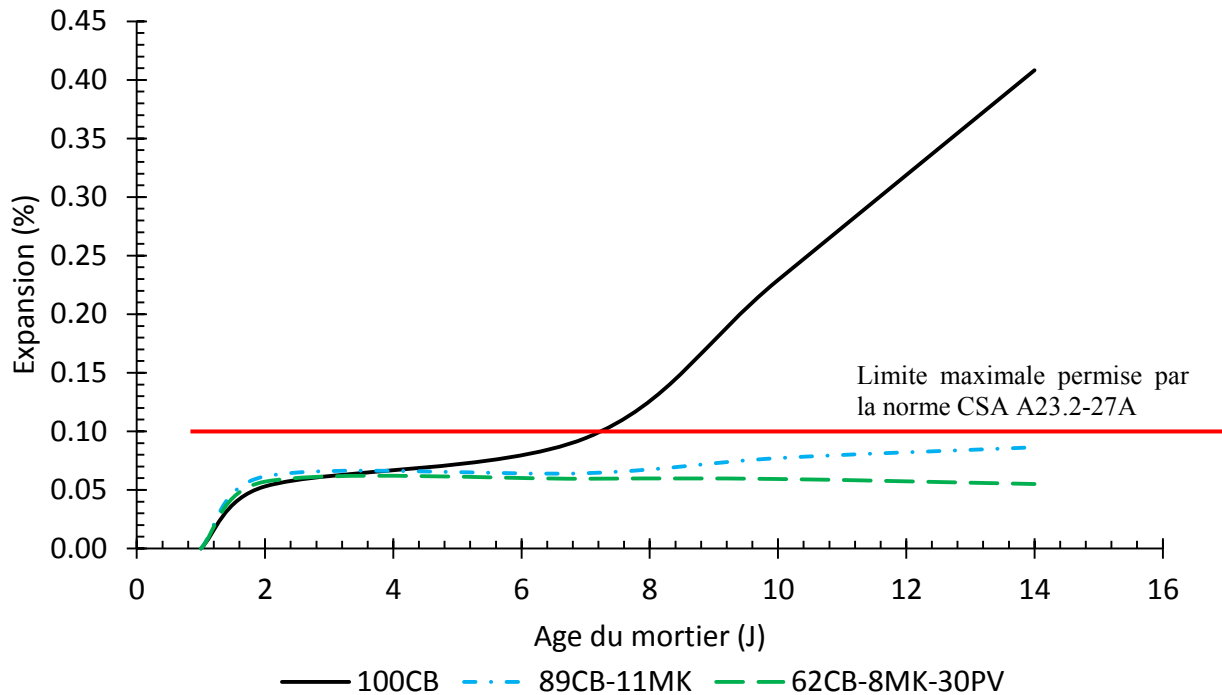


Figure 4-19 : RAS mortiers avec ciment blanc

Les mortiers réalisés avec du ciment blanc montrent que le témoin se comporte sensiblement comme les témoins réalisés avec les autres types de ciment dépassant la limite après une exposition de 7 jours. Les expansions dans les mélanges avec ajouts cimentaires respectent la limite pour la période d'exposition. Le mélange 62CB-8MK-30PV a même une légère diminution de l'expansion à 14 jours. Ce mélange a une expansion finale de 0.0550.

La poudre de verre montre que lorsqu'elle est combinée à d'autres ajouts cimentaires, elle peut arriver à contrôler la RAS par exemple lorsqu'on remplace la cendre volante à un taux de 10 %, donc qu'on passe du mélange 70GU-30CV à 70GU-20CV-10PV, on remarque que le premier mélange développe des expansions légèrement plus faibles que le second. Un phénomène similaire se produit lorsqu'on remplace la cendre volante du mélange 65GU-5MK-30CV par 20 % de poudre de verre. Cela laisse penser que la poudre de verre peut effectivement contrôler en partie l'expansion due à la RAS, mais que son action est limitée et que les performances optimales sont obtenues lors que cette dernière est utilisée dans un linge cimentaire ternaire.

Les faibles expansions observées dans les mélanges contenant des ajouts cimentaires s'expliquent par la fixation des alcalis par les C-S-H formés par ces ajouts cimentaires (Lee, Ling, Wong et Poon, 2011). Ces derniers n'étant plus disponibles pour réagir avec la silice, il y aura donc moins grande formation de gels de silice expansifs, ce qui réduit l'expansion causée par la RAS. (Shafaatian et al., 2013) ont présenté des résultats montrant que des barres de mortiers incorporant des cendres volantes de classe F et de Classe C ont développé des expansions dues à la RAS similaire à celle obtenue dans ce rapport. Ces auteurs expliquent que les cendres volantes ont plusieurs effets qui permettent le contrôle de l'expansion causée par la RAS. Les cendres volantes diminuent le coefficient de diffusion des alcalis, ce qui diminue l'alcalinité de la solution interstitielle. Cette réduction du coefficient de diffusion est due en partie à la densification de la matrice cimentaire, ce qui veut dire une diminution de la porosité et une plus grande finesse des pores et à la réaction pouzzolanique. Les gels de C-S-H créés par la réaction pouzzolanique des cendres volantes sont capables de fixer des alcalis, ce qui les retire de la solution interstitielle. La solution restante est donc moins alcaline, ce qui va diminuer la formation de gels expansifs. Il est également mentionné dans l'étude de (Shafaatian et al., 2013), que les mortiers incorporant des cendres volantes développent des résistances à la traction plus élevée dans le temps ce qui retarde l'apparition des premières fissures due à l'expansion. Cela évite également le transport des alcalis par lesdites fissures, ce qui accélérerait le processus de RAS.

Dans sa thèse, Idir mentionne que les fines de verre soit la poudre de verre peut servir à inhiber l'expansion. Cependant, il faut rester prudent, car la teneur élevée en alcalis du verre peut fournir une grande quantité d'alcalis à la solution interstitielle pouvant entraîner des expansions importantes. Selon ces études, les mécanismes de contrôle de la poudre de verre sur l'expansion sont les mêmes que ceux évoqués par (Shafaatian et al., 2013).

(Shi et al., 2005) ont expérimentés sur des mortiers incorporant des cendres volantes (20 %) ou de la poudre de verre (20 %). Ces derniers ont développé des expansions beaucoup plus faibles que celle du témoin, mais les expansions développées sont supérieures à la limite de 0,10 % à 14 jours. Le mortier avec cendres volantes a une expansion plus faible que celui avec poudre de verre. Ces derniers mentionnent qu'un remplacement de 30 % du ciment par des cendres volantes est généralement recommandé afin de contrer l'expansion délétère due à la RAS.

Suite à ces essais, les trois mélanges cimentaires ayant présenté les plus faibles expansions sont 65GU-5MK-30CV (0.0433), 65GUFA-5MK-30CV (0.0458) et 70GU-30CV (0.0465). Puisque le ciment à faible teneur en alcalis est plus difficile d'accès et que les résultats avec ciment GU sont similaires, il a été décidé de poursuivre qu'avec le Ciment GU. Les bétons sont donc fait avec des mélanges cimentaires 100 % GU, 70 % GU – 30 % CV et 65 % GU – 5 % MK et 30 % CV.

Avec les premiers résultats sur bétons obtenus avec les mélanges sélectionnés, une nouvelle série de bétons et de mortiers a été lancée. Ces bétons sont inspirés de ce que la SAQ utilise pour faire ses dalles de plancher les bétons réalisés sont un témoin 100% ciment GU et 70% granulat de verre avec du sable à béton et 30% cendres volantes avec la même composition granulaire. La Figure 4-20 présente les résultats d'expansion due à la RAG sur cette série de mortier. Les essais ont été réalisés jusqu'à l'âge de 56 jours afin de bien voir les différences entre le témoin et le mélange avec ajouts cimentaires.

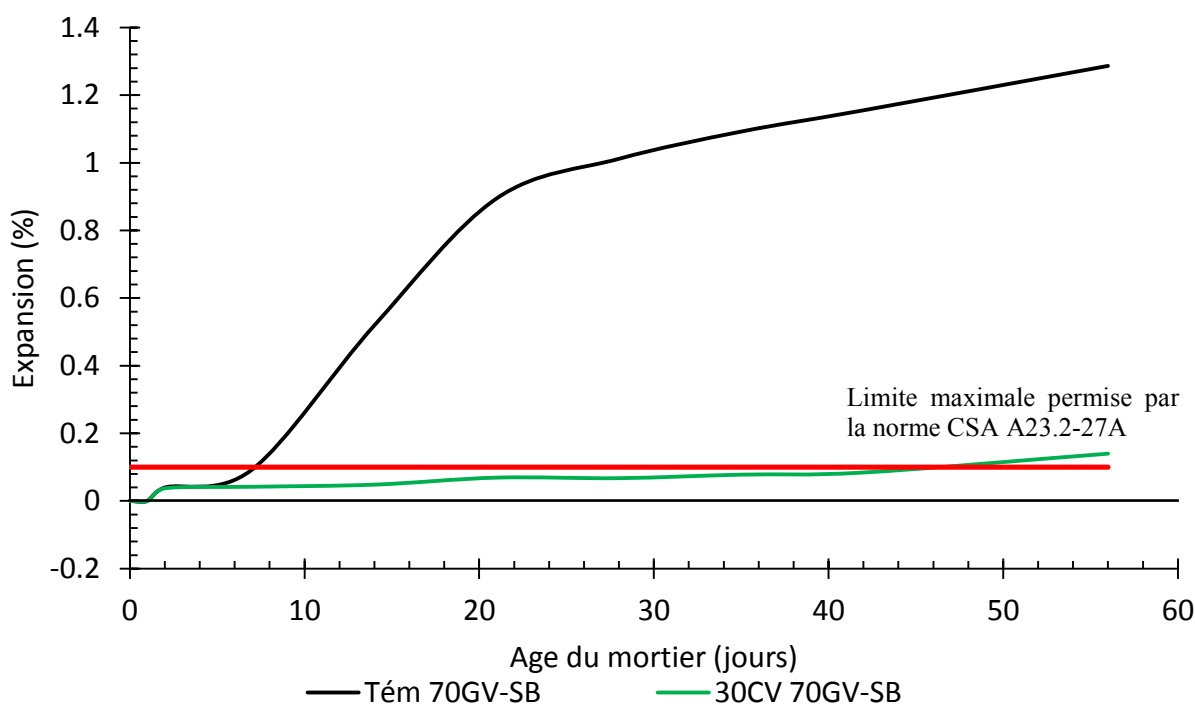


Figure 4-20 : RAS mortiers avec 70% de granulats de verre

Il est possible de voir qu'à partir de 7 jours, il commence à avoir une démarcation entre le témoin le mélange avec 30% de CV. Cette démarcation s'agrandit avec l'âge du béton. Par ailleurs, le mortier de référence a une expansion importante, dépassant la limite permise par la

norme avant 10 jours et dépassant 1% avant 28 jours. Pour ce qui est mortier avec ajout cimentaire, jusqu'à 10 jours il y a peu d'expansion. Ensuite, l'expansion se produit à un taux stable jusqu'à 40 jours. La dernière période d'essai est marquée par une augmentation du taux d'expansion. Selon la norme CAS-A23.2-27A, le mortier 30CV 70GV-SB est considéré comme non réactif, car il est en deçà de la limite de 0,10% d'expansion à 14 jours. Il faut attendre 56 jours pour que ce mortier soit près cette contrainte. Cela est dû à la réaction pouzzolanique réduisant la perméabilité du mortier permettant ainsi de réduire la pénétration d'ions néfastes pouvant entraîner l'expansion et la dégradation du mortier. Donc, selon cette norme le mortier étudié n'est pas sensible à la RAG. Il faut maintenant vérifier si cette tendance se maintient pour des bétons.

Il est aussi à noter que les échantillons de références se sont microfissurés plus rapidement que leurs homologues contenant de la CV. Les premières microfissures ont été observées à 14 jours pour le premier et 56 jours pour le second.

4.2.2 Microscopie électronique à balayage

Les observations faites au MEB permettent d'avoir une idée de l'état de la microstructure du béton. Les bétons Tem GV-SB, 30CV GV-SB et 30CV-5MK GV-SB ont été étudiés au MEB avec une concentration sur la zone de transition granulats de verre - pâte de ciment (Figure 4-21). L'emphase a été portée sur cette zone, car il s'agit d'une zone pouvant servir au transport d'ions dans le béton en plus d'être un endroit où l'on peut voir les gels de silices provenant de la RAG. Les échantillons ont été observés à l'âge de 180 jours.

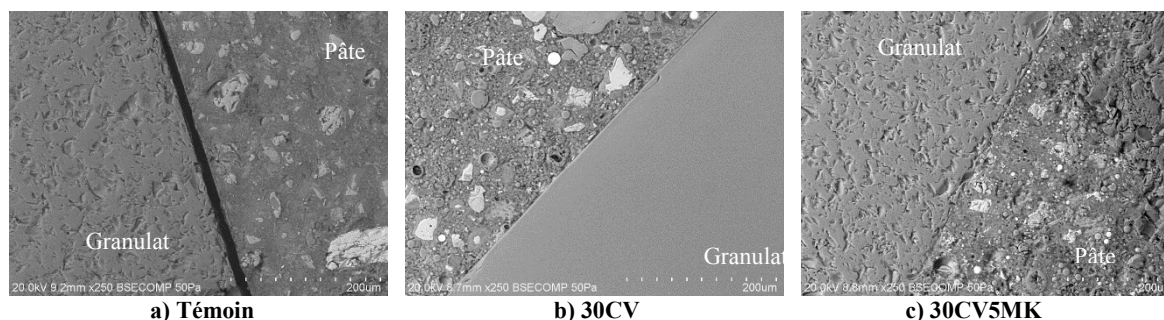


Figure 4-21 : Images MEB des bétons GV-SB – zone de transition

Il est clairement possible de voir une différence dans la zone de transition entre les bétons ayant des ajouts cimentaires et le contrôle. En effet pour le béton de référence, il est possible de voir qu'un écart entre la pâte cimentaire et le granulat de verre. Cet écart est un

passage permettant de transport d'éléments pouvant être nuisible au béton. Cela va affecter grandement la durabilité du béton particulièrement la résistance à la corrosion. Cet écart est bien présent dans tous les bétons, mais il est visible à plus petite échelle, ce qui laisse croire que la zone de transition est plus dense que le témoin (Figure 4-22).

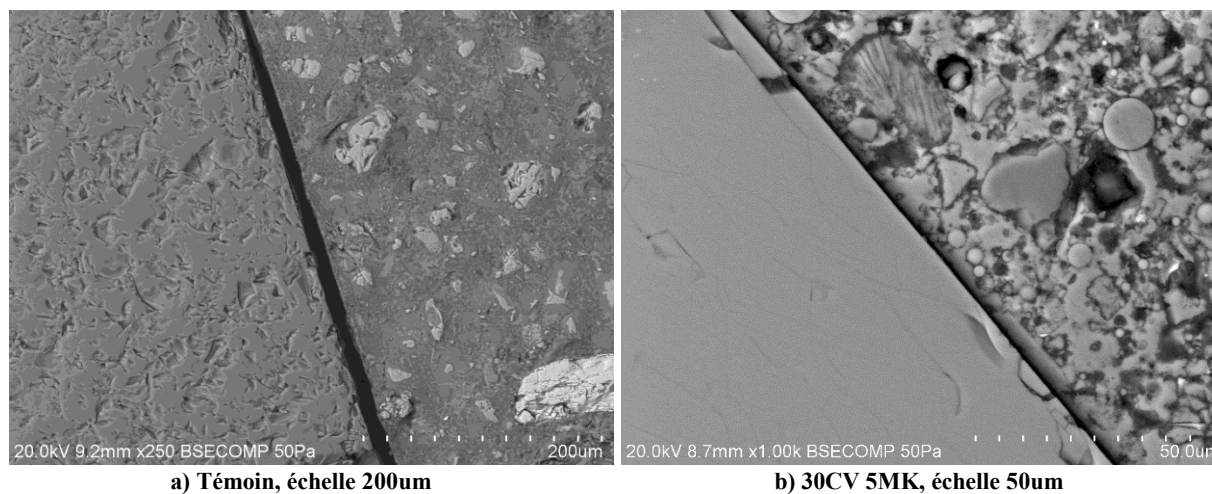


Figure 4-22 : Comparaison MEB de l'écart des zones de transition

Une autre raison des observations au MEB est la localisation de site de gels de RAG. La Figure 4-23 présente des sites trouvés pour les bétons de la série un. Des traces importantes de gel ont été décelée pour le témoin alors que les bétons en système binaires et ternaires ne montrent pas de traces de RAG. Ce qui concorde avec les résultats de RAG obtenus. Les bétons sont conservés dans les mêmes conditions soit une chambre à température et humidité contrôlée de 20 ± 3 °C et 100% humidité relative.

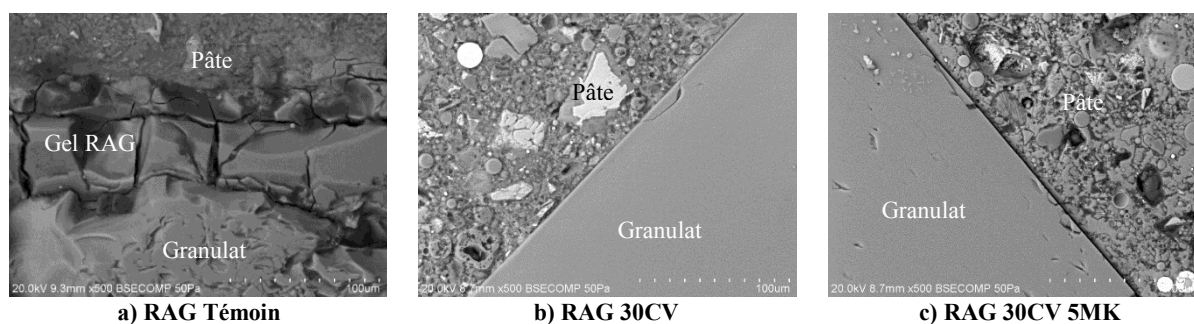


Figure 4-23 : Images MEB des bétons GV-SB – gels de RAG

4.2.3 Formulation des mélanges de béton

Les résultats des mortiers ont permis de formuler les bétons suivants. Trois séries de béton ont été réalisées. La première est faite avec un remplacement complet de granulats par des granulats de verre. La seconde est faite en remplaçant les granulats et la pierre par des granulats de verre de dimension correspondante. Sur les trois séries, les séries un et deux ont été faites en suivant la norme CSA A23.2-14A alors que la série trois est inspirée des mélanges utilisés par la SAQ qui contient 70% de granulats de verre et du sable à béton. Cette série se rapproche beaucoup de ce qui est fait dans l'industrie. De plus, cette série n'a pas d'alcalis ajoutés dans le béton comme le demande la norme CSA. La formulation des mélanges est présentée au Tableau 4-20.

Tableau 4-20 : Formulation des bétons réalisés

	Série 1			Série 2			Série 3	
	Tem 100GV- 100SB	30CV 100GV- 100SB	30CV-5MK 100GV- 100SB	Tem 100GV- 100SV	30CV 100GV- 100SV	30CV-5MK 100GV- 100SV	Tem 70GV- 100SB	30CV 70GV- 100SB
Rapport E/L	0.45	0.45	0.45	0.45	0.45	0.45	0.5	0.5
Eau	189 kg	189 kg	189 kg	189 kg	189 kg	189 kg	175 kg	175 kg
Ciment GU	420 kg	294 kg	273 kg	420 kg	294 kg	273 kg	---	---
Ciment GU faible teneur en alcalis	---	---	---	---	---	---	350 kg	245 kg
Cendres volantes	---	126 kg	126 kg	---	126 kg	126 kg	---	105 kg
Métakaolin	---	---	21 kg	---	---	21 kg	---	---
Sable à béton	578 kg	539 kg	534 kg	---	---	---	925 kg	892 kg
Sable de verre	---	---	---	583 kg	543 kg	538 kg	---	---
Pierre 5-20	---	---	---	---	---	---	300 kg	300 kg
Granulat de verre 5-20	1070 kg	1070 kg	1070 kg	1070 kg	1070 kg	1070 kg	650 kg	650 kg
NaOH	2.98 kg	2.09 kg	1.94 kg	2.98 kg	2.09 kg	1.94 kg	---	---
EUCON DX (ml/100kg liants)	---	---	---	---	---	---	175	140

4.2.4 Essais à l'état frais

Le Tableau 4-21 présente les propriétés à l'état frais des trois séries de bétons échantillonnés. Il est à noter que les séries de bétons numéro un et deux ont été réalisées en suivant les restrictions sur la formulation du mélange, comme mentionné dans la norme CSA A23.2-14A pour l'évaluation de la RAG sur prismes de béton. Ces exigences de la norme principalement celle restreignant l'utilisation d'adjuvants, ainsi que la forme des

granulats de verre fait en sorte que la maniabilité du béton va être affectée. Afin d'aider à la mise en place du matériau, la compaction a été faite avec vibration au lieu d'une compaction par pilonnage. La troisième série de béton a été réalisée par la suite et a été réalisée en suivant une recette utilisée par la SAQ pour ses dalles de plancher. Cette série est inspirée de ce qui s'est fait dans l'industrie et n'a pas les restrictions de la norme CSA A232-14A.

Tableau 4-21 : Propriétés à l'état frais

	Série 1			Série 2			Série 3	
	Tem 100GV- SB	30CV 100GV- SB	30CV- 5MK 100GV- SB	Tem 100GV- SV	30CV 100GV- SV	30CV- 5MK 100GV- SV	Tém 70GV- SB	30CV 70GV-SB
Affaissement (mm)	150*	30.0	0.0	185*	5.0	160*	55	100
Teneur en air (%)	1.6	2.2	1.6	6.0	2.4	3.7	3.1	2.8
Masse volumique (kg/m ³)	2303	2256	1852	1910	2103	1773	2331	2302
Température (°C)	26.0	25.6	25.1	24.0	25.9	24.7	22	21.6

*Au lieu de s'affaisser, la forme de béton s'est brisée. La valeur n'est donc pas représentative de l'affaissement du béton.

Comme mentionné précédemment, pour la première et deuxième série de bétons, ceux-ci sont peu maniables et les résultats d'affaissement le montrent bien. Les essais où le cône s'est brisé ont été repris et le même phénomène s'est reproduit. Le mélange Tém 100GV-SV a une teneur en air élevée. Cela est probablement dû à la difficulté de mise en place du matériau dans le récipient et la difficulté subséquente à bien remplir d'eau les vides avant de prendre la mesure de l'air. Il est également possible de remarquer que les masses volumiques des bétons avec ajouts cimentaires granulats de verre et sable à béton sont plus faibles que celles du témoin. Cette observation est attribuable à la densité plus faible des ajouts cimentaires. Pour les bétons avec granulats de verre et sable de verre, la valeur de la masse volumique du témoin est plus faible que celle du mélange avec 30 % de cendres volantes. Cela est causé par le manque de maniabilité du béton témoin, comme expliqué précédemment. La maniabilité de cas béton est beaucoup plus faible pour les bétons témoins. L'ajout des cendres volantes et du métakaolin a beaucoup aidé à la maniabilité. Les ajouts cimentaires particulièrement les cendres volantes sont constituées de particules de forme sphérique qui contribuent à l'amélioration de la maniabilité. De plus, du fait que ces ajouts ont des densités plus faibles que celle du ciment type GU, leur incorporation dans la matrice en substitution partielle d'une

masse équivalente de ciment fait augmenter le volume total de pâte et par conséquent faciliterais aussi la maniabilité. Il a été très difficile de faire les cylindres pour les essais de résistivité et de résistance à la compression. Il est possible que ce manque de maniabilité se reflète dans certains résultats.

Les problèmes de mise en place des premiers bétons confectionnés ne se sont pas répétés pour la troisième série. Cela est dû principalement au fait que les bétons ont été confectionnés sans suivre les restrictions de la norme CSA A23.2-14A. Il a donc été possible d'ajouter des adjuvants comme un réducteur d'eau. Le témoin a tout de même un affaissement faible. Cependant, les bétons restent dans la plage visée qui est de 80 ± 30 mm. L'effet des CV sur la maniabilité est mis en exergue. Les teneurs en air et les masses volumiques sont similaires pour tous les mélanges étudiés dans cette série.

4.2.5 Essais de propriétés mécaniques et durabilité

4.2.5.1 Résistance à la compression

La résistance à la compression permet d'avoir un indice rapide des propriétés mécaniques d'un béton. Bien que les bétons étudiés soient architecturaux, il est important d'avoir un minimum de résistances à la compression. Par exemple pour les briques et maçonneries il est demandé 20 MPa selon la norme CSA A165-4 pour des bétons de catégorie : utilisation extérieure. La Figure 4-24 présente la résistance à la compression des bétons de la série un. La Figure 4-25, elle montre la résistance à la compression des bétons de la série deux. La dernière figure, la Figure 4-26, présente les résultats de la série de béton numéro trois. Tous les bétons étudiés sont comparés à un mélange ne contenant pas d'ajouts cimentaires et ayant la même configuration granulométrique et un autre béton sans ajouts cimentaires et sans granulats de verre.

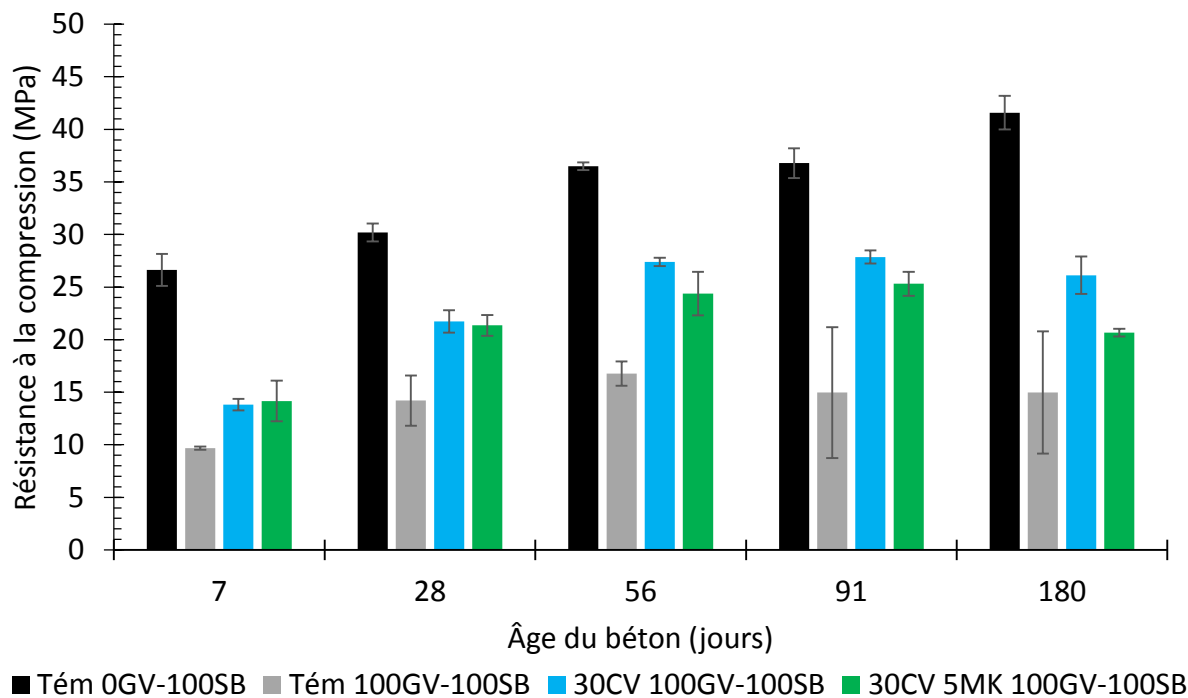


Figure 4-24 : Résistance à la compression de bétons avec un remplacement de 100% des granulats

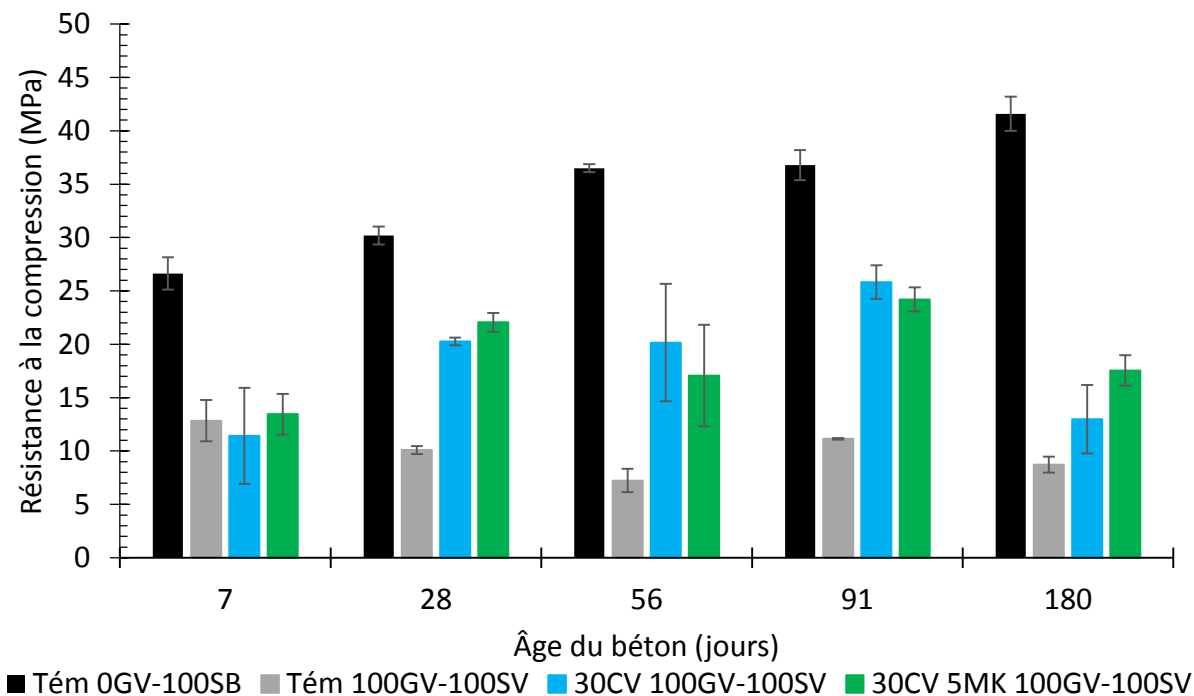


Figure 4-25 : Résistance à la compression de bétons avec un remplacement de 100% des granulats et du sable

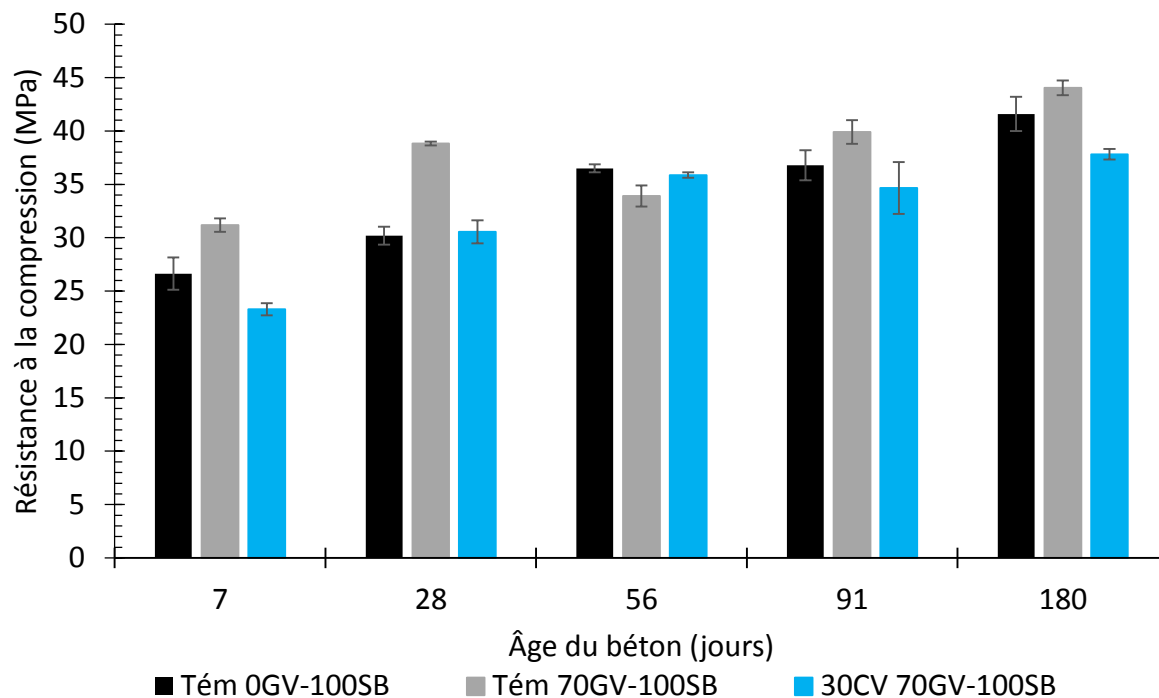


Figure 4-26 : Résistance à la compression de bétons avec un remplacement de 70% des granulats

Les résultats des bétons des séries un et deux montrent une diminution importante lorsqu'ils sont comparés avec le béton de référence. Ceci est dû à la difficulté de mise en place. Cette problématique due aux granulats de verre (forme et angularité) et au manque d'adjuvants chimiques a entraîné une mauvaise consolidation, ce qui par le fait même diminue la résistance à la compression. Les échantillons les plus beaux ont été utilisés pour les échéances de 28 et 91 jours, où l'on remarque que sur ces deux figures il y a généralement moins de variation pour ces deux échéances que sur les autres. Une grande variation des résultats exprime bien la difficulté de mise en place liée aux granulats de verre. (Kateb, 2009) a travaillé avec des granulats fins et grossiers et a observé que plus le taux de remplacement granulaire augmente, plus les résistances à la compression sont affectées au point qu'à un taux de remplacement de 100 % des granulats et du sable, les résistances développées sont seulement de 34 % de celles du témoin à 28 jours. Selon lui, cela est dû à la mauvaise adhérence entre les particules de verre et la pâte de ciment, ceci favorise la génération et la propagation de fissures le long de la zone d'interface granulat-pâte.

Cette diminution des résultats qui est même plus marquée pour le témoin avec granulats de verre, car les ajouts cimentaires des autres bétons ont eu un effet fluidifiant qui a

aidé un peu à la mise en place. De plus, comme la densité des ajouts cimentaire est un peu plus faible que celle du ciment et que le dosage est fait en remplacement massique, il y a donc légèrement plus de pâte améliorant également la fluidité du béton. Malgré ces diminutions de performances, les bétons binaires ou ternaires respectent tous la norme CSA A165-4 qui demande 20 MPa pour des briques creuses servant sur des surfaces exposées aux intempéries. Bien que cette norme concerne les briques et blocs de maçonnerie, cette limite a été référée, car cette norme parle de béton pour une application architecturale. Les bétons utilisés n'ont pas été confectionnés sous forme de brique, mais comme une des applications visées est la même, il est logique de se dire qu'un minimum de performances mécanique est nécessaire.

La troisième série de béton avec un remplacement granulaire partiel a développé des résistances mécaniques bien supérieures aux séries un et deux. Dès 28 jours, les bétons avec granulats de verre ont rattrapé le contrôle. Le témoin a une valeur de près de 10 MPa de plus que le contrôle. Cette valeur est probablement erronée lorsqu'on observe les tendances des échéances suivantes. Il n'en est pas moins qu'à l'âge de 91 jours, le témoin avec GV a surpassé les contrôles et le béton binaire est légèrement inférieur au contrôle. Cette série de béton passe largement les critères de la norme CSA A165-4.

4.2.5.2 Résistivité électrique

La résistivité électrique fournit une information similaire à l'essai de pénétrabilité des ions chlorure. Cet essai consiste à faire passer un courant dans l'échantillon et de mesurer la résistance du béton à ce courant. C'est un essai non destructif et donne un bon indice du potentiel de corrosion. De plus, l'essai de résistivité est beaucoup plus rapide à réaliser que l'essai pénétrabilité des ions chlorure. La résistivité électrique des bétons contenant 100% de granulats de verre et 100% sable à béton est présentée sur la Figure 4-27. Celle des bétons réalisés avec 100% de granulats de verre et de sable de verre est montrée sur la Figure 4-28. Par ailleurs, la Figure 4-29, expose les résultats de la série de bétons contenant 70% de granulats de verre et du sable à béton. Tous les bétons étudiés sont comparés sans ajout cimentaire et sans granulat de verre.

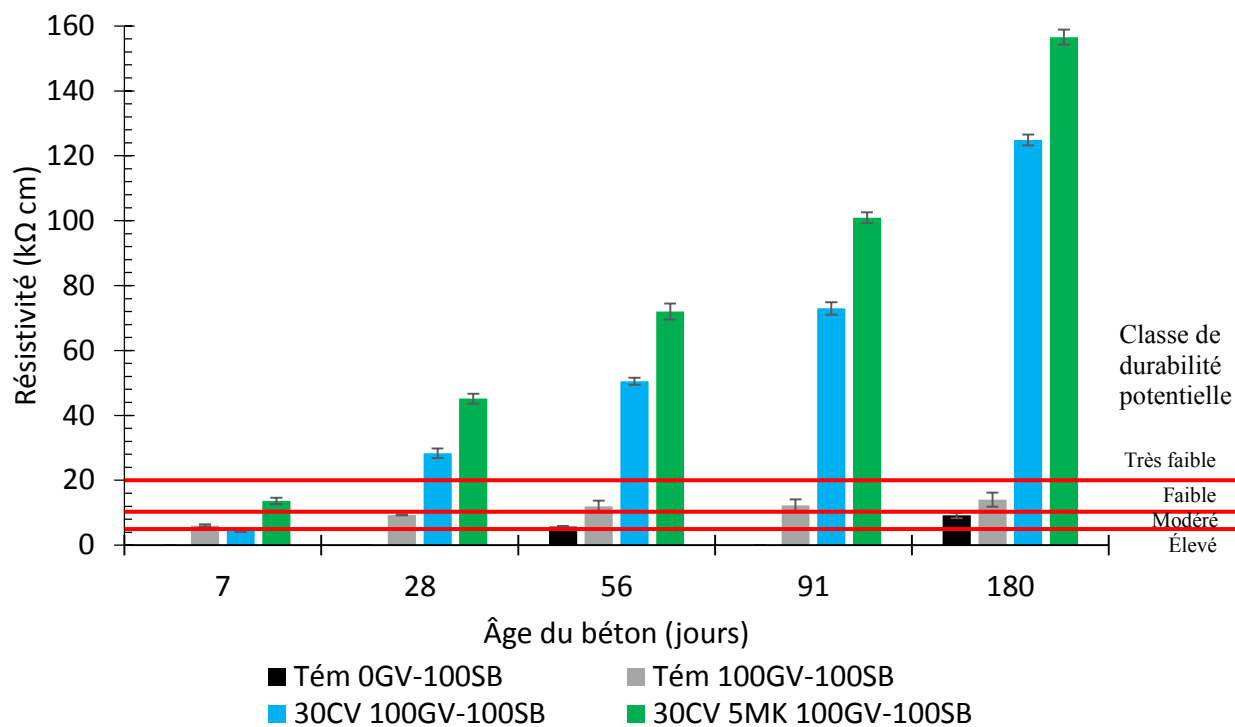


Figure 4-27 : Résistivité électrique de bétons avec un remplacement de 100% des granulats

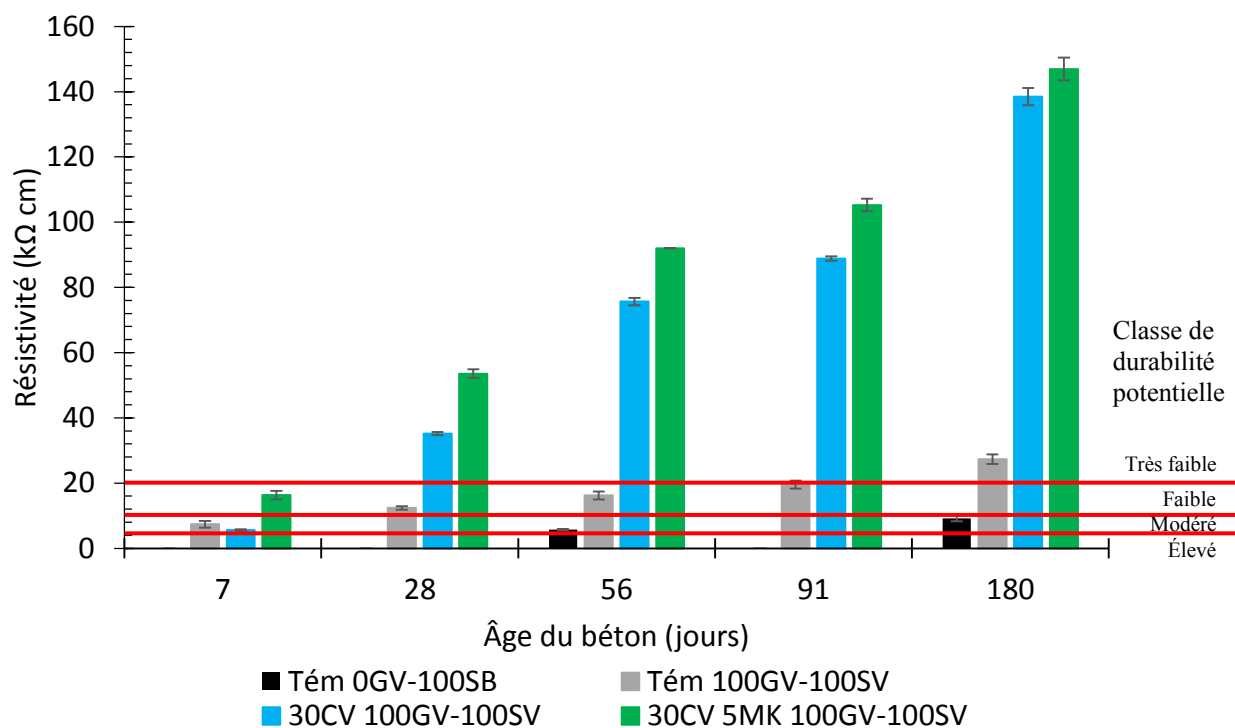


Figure 4-28 : Résistivité électrique de bétons avec un remplacement de 100% des granulats et du sable

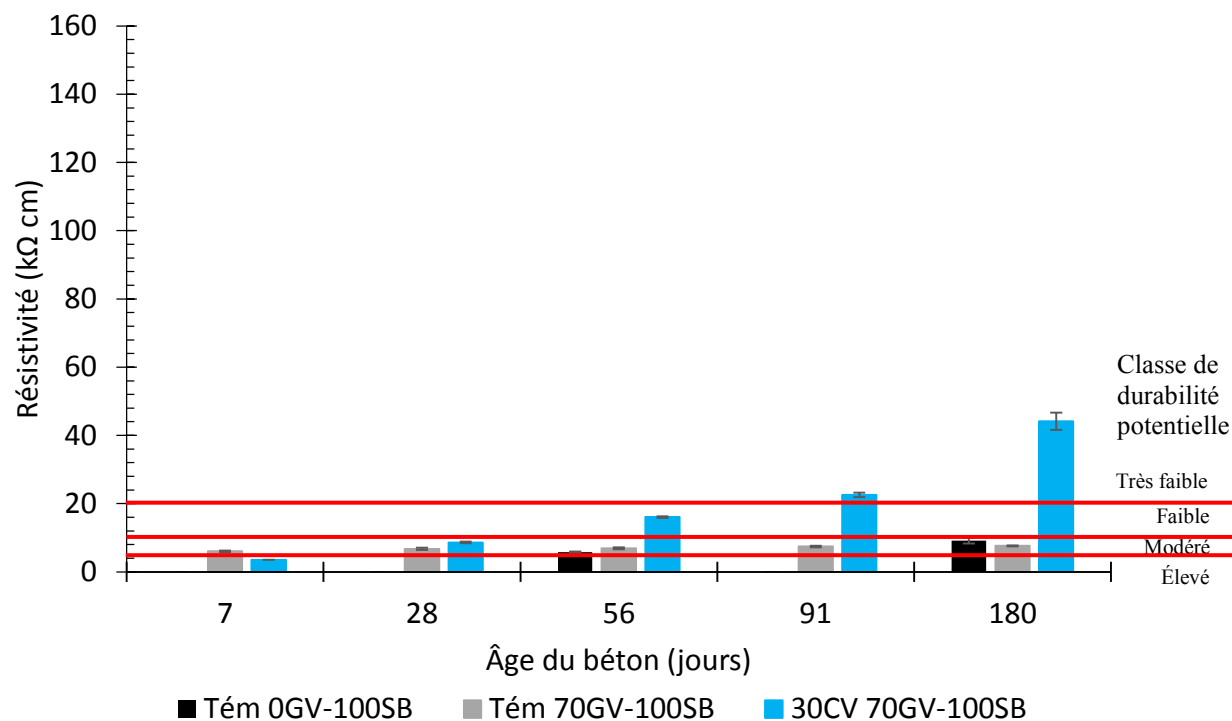


Figure 4-29 : Résistivité électrique de bétons avec un remplacement de 70% des granulats

L'observation de ces figures montre que tous les bétons qui contiennent des granulats de verre ont une résistivité électrique supérieure au contrôle qui n'en contient pas. En effet, même les témoins contenant un remplacement complet par des granulats de verre sont classés dans une classe de durabilité meilleure. De plus, les bétons contenant des granulats de verre et ajouts cimentaires ont développé des résistivités largement supérieures aux bétons de contrôle 100 % GU avec granulats de verre ou sans granulats de verre. Dès l'âge de 28 jours, les mélanges binaires et ternaires sont classés comme très faibles. Cette tendance est présente tant pour les bétons 100GV-100SB que pour les bétons 100GV-100SV. Les ajouts cimentaires ont un grand rôle dans la diminution de la perméabilité du béton. Cela est dû par une diminution de la dimension des pores et de leurs connectivités. Cela rend donc le béton moins perméable à l'eau et aux ions chlorure. Les cendres volantes réagissent avec la chaux et produisent des gels de C-S-H améliorant la structure de la pâte cimentaire. Ces deux phénomènes expliquent pourquoi les résistivités électriques sont supérieures aux bétons de référence. Cependant, ces deux réactions ne sont peut-être pas les seules à expliquer les valeurs si élevées de résistivité électrique.

Dans ses travaux, Zidol a mesuré la résistivité électrique de bétons de rapport E/L 0,45 et contenant 30 % de cendres volantes, et sans granulats de verre. L'âge des bétons lors de la mesure de résistivité était de deux ans et demi. La moyenne des échantillons mesurée est de 110 k Ω cm alors que pour les bétons 30CV GV-SB et 30 CV GV-SV les moyennes sont de 125 k Ω cm et 138 k Ω cm respectivement à l'âge de 180 jours. Ces trois bétons se trouvent globalement dans la même plage de résistivité et sont classés dans la catégorie de risque de corrosion très faible.

Une explication possible des valeurs de résistivité très élevées est l'utilisation du NaOH dans les bétons. En effet, les bétons 100GV avec ajouts cimentaires contiennent du NaOH et ont développé une résistivité très grande alors que les bétons contenant 70 % GV ne contenant pas de NaOH ont présenté des valeurs de résistivité beaucoup plus faible. La diminution de la quantité de GV n'est probablement pas assez grande pour expliquer toute cette différence. Les granulats de verre doivent tout de même avoir une certaine influence puisque lorsqu'on compare les bétons de référence 0GV et Tem 70GV-SB, on remarque qu'à 56 et 180 jours que ces bétons sont situés dans la même classe de durabilité potentielle. Alors que le béton avec 30 % de CV a une résistivité bien supérieure même si elle ne se compare pas à ses homologues de la série 1 en termes de valeur numérique. Les observations au MEB ont montré qu'il y a une grande zone d'interface entre les granulats de verre et la pâte cimentaire. Ceci aurait pour effet de créer un chemin préférentiel pour l'eau et les autres agents pouvant dégrader le béton. Les ajouts cimentaires se sont montrés très efficaces pour réduire la zone de transition, ce qui permet de diminuer la perméabilité du béton au lieu de l'augmenter comme mentionner précédemment. Les résultats présentés aux figures précédentes montrent bien ce phénomène.

4.2.5.3 Résistance à la réaction alcalis-granulats sur béton

La limite permise par la norme demande une expansion maximale de 0,04 % après 1 an d'exposition afin de montrer que l'ajout ou le mélange d'ajouts cimentaire contrôle efficacement l'expansion causée par la RAS. La Figure 4-30 présente la résistance à la RAG des bétons contenant 100% de granulats de verre et 100% sable à béton. La Figure 4-31, montre les résultats de résistance à la RAG des bétons réalisés avec 100% de granulats de verre et de sable de verre. La dernière figure, la Figure 4-32, présente les résultats de la série

de bétons contenant 70% de granulats de verre et du sable à béton. Les résultats jusqu'à un an d'exposition sont présentés.

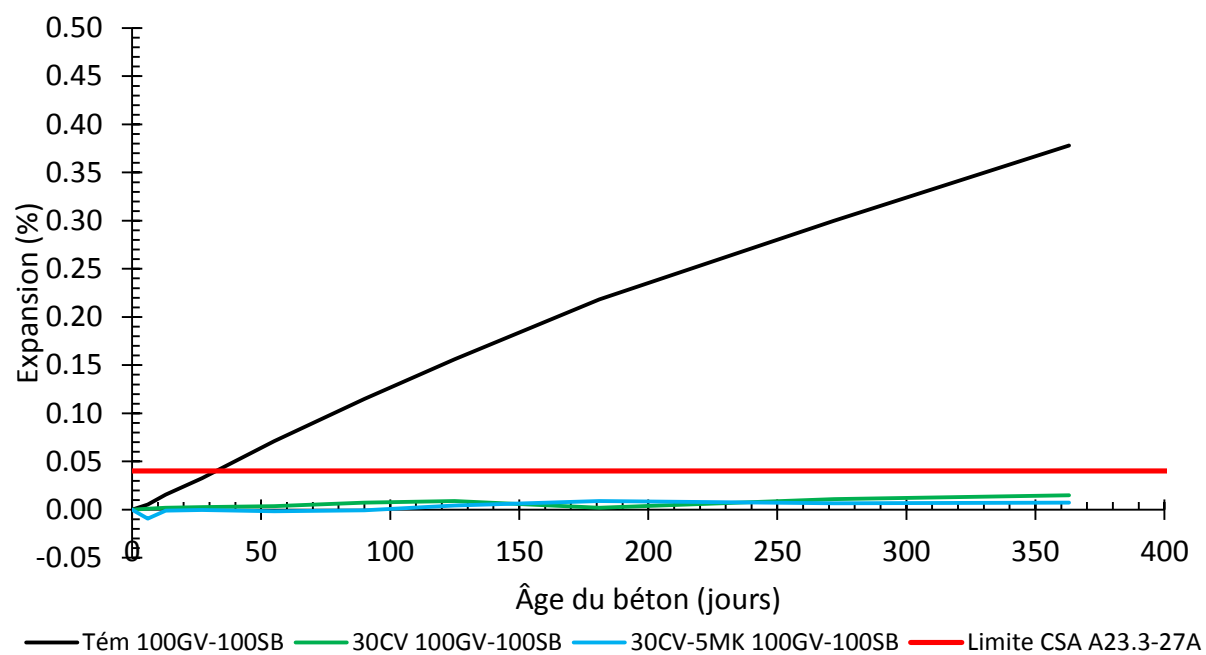


Figure 4-30 : Résistance à la RAG de bétons avec un remplacement de 100% des granulats

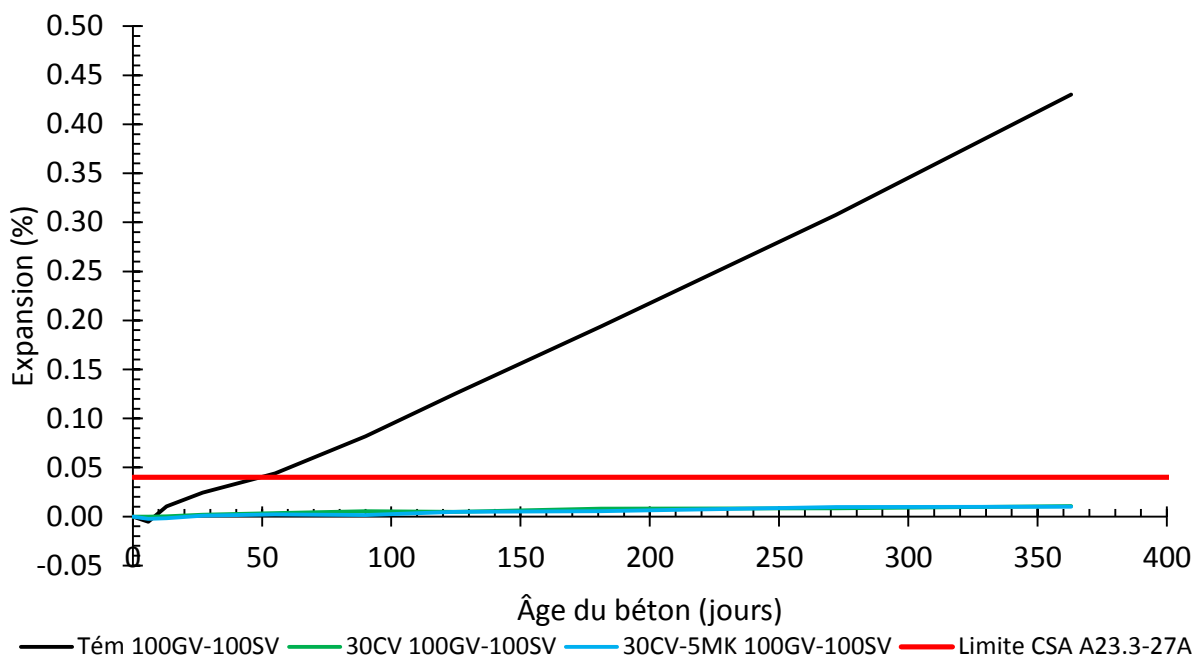


Figure 4-31 : Résistance à la RAG de bétons avec un remplacement de 100% des granulats et du sable

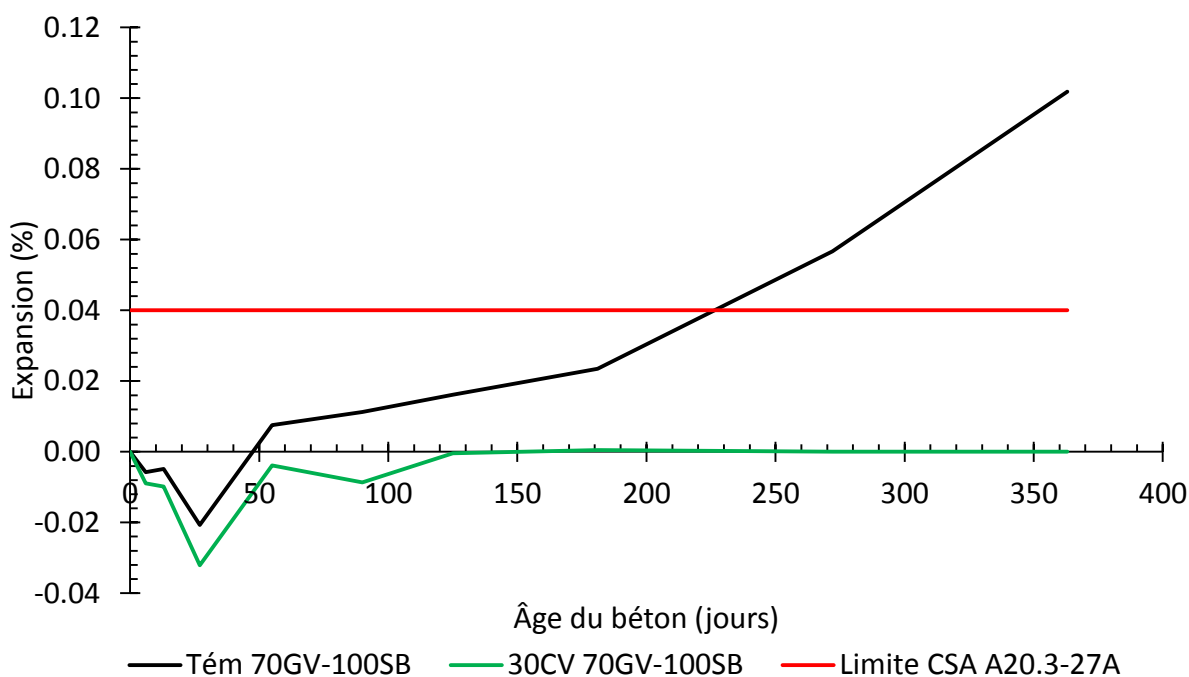


Figure 4-32 : Résistance à la RAG de bétons avec un remplacement de 70% des granulats

Lorsqu'on observe les courbes présentées aux figures ci-dessus, il est possible de voir une séparation entre les bétons témoins et les bétons contenant des ajouts cimentaires. En effet pour la série de bétons numéro 1, le témoin dépasse les exigences de la norme (0,04 % d'expansion) à environ 30 jours alors que les mélanges 30CV et 30CV-5MK ont développé 0,015 % et 0,007 % d'expansion à 365 jours d'exposition. Cette tendance est remarquée également dans les bétons de la deuxième série de béton. Le Tableau 4-22 présente le pourcentage de réduction de l'expansion des bétons avec ajouts cimentaires comparés à leur contrôle respectif. Il est possible d'y noter une réduction très importante, quel que soit le type de mélange. Le tableau montre aussi qu'il y a peu de différence entre le béton binaire et ternaire. Cette même observation se fait également pour les mélanges granulaires 100GV-100SB et 100GV-100SV.

Les observations au MEB, présenté à la section 4.2.2, sont concordant avec les résultats présentés dans cette section soit que le témoin a montré des traces de RAG plus importantes que le béton 30 CV et 30CV-5MK. De faibles traces de RAG ont été observées sur le béton 30CV et aucune n'a été observée sur le béton 30CV-5MK ce qui est représentatif des faibles expansions des bétons avec ajouts cimentaires comparés au témoin.

Tableau 4-22 : Pourcentage de réduction de l'expansion due à la RAG des bétons avec granulats de verre

Nom du mélange	Réduction de l'expansion (%)
30 CV 100GV-100SB	96,1 %
30CV-5MK 100GV-100SB	98,1 %
30 CV 100GV-100SV	97,5 %
30CV-5MK 100GV-100SV	97,7 %
30 CV 70GV-100SB	100,0 %

Les bétons contenant 70 % de granulats de verre n'ont pas encore d'écart significatif entre le témoin le 30%CV. Il faut tout de même rappeler que les résultats présentés sont seulement jusqu'à l'âge d'un an sur les 2 ans de la durée prévue de l'essai. Il est tout de même possible de voir que le taux d'expansion du béton binaire est très faible comparé au témoin. Il ne faut pas oublier que ces bétons ne contiennent pas de NaOH comme le demande la norme. Il y aura donc moins d'expansion tant pour le béton binaire que pour le béton de référence. Il est donc normal que les expansions observées pour cette série de béton soient plus faibles que pour les autres. Il faut cependant attendre la conclusion de l'essai avant de dire si cette combinaison cimentaire sera vraiment efficace.

CHAPITRE 5 CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS

La première partie de l'étude porte sur l'étude d'une poudre de verre venant d'une différente source que le verre sodocalcique et son potentiel en tant qu'ajout cimentaire. Son comportement est également comparé à la poudre de verre sodocalcique. La méthode de broyage, bien qu'artisanale a produit une PVE avec une finesse similaire à la PV lorsque broyée selon la même méthode. Si la PVE vient à être broyée de façon plus industrielle, il est recommandé de faire des essais sur bétons afin de confirmer la performance de la PVE puisque sa finesse sera différente. Les propriétés à l'état frais ont montré qu'il est possible d'obtenir une maniabilité et une teneur en air adéquate sans trop de difficultés. Cependant, il semblerait qu'il y ait une interaction entre les adjuvants et la PVE. Des essais ont montré que cette dernière n'entraîne pas d'air, mais lorsque combinée à un réducteur d'eau et un agent entraîneur d'air, il a fallu diminuer le dosage afin de maintenir un affaissement et une teneur en air similaire au témoin. Les bétons de PVE ont montré de propriétés mécaniques similaires ou supérieures au témoin. Pour ce qui est des performances de durabilités, la PVE s'est montrée très performante pour diminuer la perméabilité des bétons comme l'ont montré les résultats de pénétrabilité aux ions chlorure et de résistivité électrique. Cependant, ce matériau s'est avéré susceptible à l'écaillage. Les trois bétons ont montré des pertes de masse à l'écaillage supérieures à 91 jours qu'à 28 jours que ce soit selon les normes ASTM ou BNQ. Pour une utilisation adéquate de la PVE, il est recommandé des applications non exposées à l'écaillage ni à la RAG, jusqu'à ce que les essais soient complétés et qu'il soit possible de prouver le potentiel de résistance à la RAG de la PVE. En ce qui concerne l'hypothèse de la PVE ayant un comportement semblable à la PV. Les résultats comparés aux travaux de Zidol ont montré que globalement la PVE a développé des performances similaires à leur homologue contenant de la PV. Comme le verre électronique est un matériau peu connu cette étude offre un bon point de départ pour l'utilisation de la PVE dans le béton. L'objectif de cette phase du projet est d'évaluer la PVE en tant qu'ajout cimentaire. Il est bien possible de faire du béton avec la PVE. L'étude sur ce matériau peut se poursuivre par l'utilisation de PVE dans des bétons haute performance tel que prévu dans le projet initial.

La seconde partie de l'étude s'est concentrée sur comment contrôler l'expansion engendrée par la réaction alcalise silice dans des bétons architecturaux contenant des granulats de verre, tout en maintenant l'aspect architectural du verre. Pour atteindre cet objectif, l'intérêt s'est porté sur l'optimisation de la matrice cimentaire.

À cet effet, une grande série de combinaisons de ciments et d'ajouts cimentaires a été réalisée sous forme de mortiers. Les matériaux cimentaires ont été choisis pour maintenir la couleur de la pâte la plus pâle possible afin de maximiser l'effet des granulats de verre dans le béton, le ciment GU, GU-Pale, GU à faible teneur en alcalis, le ciment blanc, les cendres volantes, le métakaolin et la poudre de verre ont été étudiés. Les combinaisons cimentaires les plus efficaces sont le ciment GU avec un remplacement de 30 % par des cendres volantes pour un mélange binaire et un remplacement de 35 % du ciment par 30 % de cendres volantes et 5 % de métakaolin.

Avec ces résultats, il a été possible de faire trois séries de bétons. Les deux premières ont été faites selon la norme CSA A23.2-14A avec un remplacement complet des granulats par du verre pour la série 1 et un remplacement complet du sable et des granulats pour la série 2. La troisième série a été basée sur ce qui a été fait dans l'industrie avec un remplacement de 70 % des granulats par du verre. L'étude sur les bétons a montré que les bétons de verre sont difficiles à réaliser, dû à la forme des granulats. Les essais de RAS montrent que l'expansion due à cette dernière peut être contrôlée par les ajouts cimentaires. De plus, ces ajouts améliorent la perméabilité et la fluidité des bétons en plus de densifier la zone de transition. Cette étude ouvre la porte à une utilisation plus grande des granulats de verre dans les bétons architecturaux.

Les perspectives pour cette phase du projet sont ;

- L'évaluation d'autres combinaisons cimentaires.
- Effectuer des tests in situ.
- Améliorer l'approvisionnement en granulats de verre.

BIBLIOGRAPHIE

- Boddy, A. M., Hooton, R. D. et Thomas, M. D. A. (2003). The effect of the silica content of silica fume on its ability to control alkali-silica reaction. *Cement and Concrete Research*, 33, 1263- 1268.
- Chappex, T. et Scrivener, K. (2012a). Alkali fixation of C-S-H in blended cement pastes and its relation to alkali silica reaction. *Cement and Concrete Research*, 42(8), 1049- 1054. Consulté à l'adresse <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconres.2012.03.010>
- Chappex, T. et Scrivener, K. L. (2012b). The influence of aluminium on the dissolution of amorphous silica and its relation to alkali silica reaction. *Cement and Concrete Research*, 42(12), 1645- 1649.
- Chappex, T. et Scrivener, K. L. (2013). The effect of aluminum in solution on the dissolution of amorphous silica and its relation to cementitious systems. *Journal of the American Ceramic Society*, 96(2), 592- 597.
- Chen, C. H., Huang, R., Wu, J. K. et Yang, C. C. (2006). Waste E-glass particles used in cementitious mixtures. *Cement and Concrete Research*, 36(3), 449- 456.
- Cyr, M., Escadeillas, G., Broillard, P. et Deteuf, C. Métakaolin, addition, pouzzolanique pour bétons - définition, spécification et critères de conformité (2010).
- de Louvigny, N. (2001). *Conséquences de l'apport de verre pilé à la surface du champ et de son incorporation dans la couche travaillée*. Université de Montpellier II.
- Diamond, S. (1989). Another look at mechanisms. *8th International Conference on Alkali Aggregate Reaction* (p. 83- 93). Kyoto.
- Duchesne, J. et Bérubé, M. A. (1994). The effectiveness of supplementary cementing materials in suppressing expansion due to ASR: another look at the reaction mechanisms. *Cement and Concrete Research*, 24(2), 73- 82.
- Duval, A. et Bouguillon, A. (s.d.). *La microscopie électronique à balayage*.
- Eberhart, J. P. (1997). *Analyse stucturale et chimique des materiaux*. (Dunod, Dir.). Paris.
- El Gattoui, M. (1998). *Évaluation comparative des bétons fluides contenant différents agents*

- colloïdaux*. Université de Sherbrooke.
- Gagné, R. (2014). *Notes de cours - Durabilité des bétons*.
- Hanna, K., Morcous, G. et Tadros, M. (2014). Effect of Supplementary Cementitious Materials on the Performance of Concrete Pavement. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 26(4), 789- 793.
- Idir, R. (2009). *Mécanisme d'acton des fines et des granulats de verre sur la réaction alcali-silice et la réacton pouzzolanique*. Université de Toulouse.
- Jin, C., Meyer, C. et Baxter, S. (2000). « Glasscrete » - Concrete with glass aggregate. *ACI Materials Journal*, 97, 208- 213.
- Kandasamy, S. et Shehata, M. H. (2014). The capacity of ternary blends containing slag and high-calcium fly ash to mitigate alkali silica reaction. *Cement and Concrete Composites*, 49, 92- 99.
- Kateb, M. L. (2009). *Utilisation des granulats de verre dans la fabrication des bétons architecturaux «cas des briques en béton»*. Université de Sherbrooke.
- Kouassi, S. S. (2011). *Étude de la dissolution d'un réseau silicaté en présence d'une solution alcaline*. Université de Toulouse.
- Lee, G., Ling, T. C., Wong, Y. L. et Poon, C. S. (2011). Effects of crushed glass cullet sizes, casting methods and pozzolanic materials on ASR of concrete blocks. *Construction and Building Materials*, 25(5), 2611- 2618.
- Martin, J. L. et George, A. (1998). *Caractérisation des matériaux-II*. (P. P. e U. Romandes, Dir.). Lausanne.
- Meyer, C. et Xi, Y. P. (1999). Use of recycled fly ash for precast concrete. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 11(2), 89- 90.
- Nmai, C. K. (2006). Freezing and Thawing. In J. F. Lamond et J. H. Pielert (dir.), *significance of tests and proprties of concrete & concrete making materials* (p. 154- 164). ASTM International.
- Oss, G. van (2013). *Geological survey, mineral commodity summaries - cement*.

- Park, S. B., Lee, B. C. et Kim, J. H. (2004). Studies on mechanical properties of concrete containing waste glass aggregate. *Cement and Concrete Research*, 34(12), 2181- 2189.
- Poole, A. B. (1992). Alkali-silica reactivity mechanisms of gel formation and expansion. *9th International conference on alkali aggregate reaction* (p. 782- 787). Londres.
- Ramlochan, T., Thomas, M. et Gruber, K. a. (2000). The effect of metakaolin on alkali-silica reaction in concrete. *Cement and Concrete Research*, 30, 339- 344.
- Recyc-Québec (2014). *Bilan de la gestion des matières résiduelles au Québec, 2008*. Consulté à l'adresse <http://www.recyc-quebec.gouv.qc.ca/Upload/Publications/MICI/Rendez-vous2009/Bilan2008.pdf>
- Robit, P., Cyr, M., Husson, B., Casaux-Gineste, G. et Trinh, Q. M. (2012). Coulis de faible émission carbone à base de métakaolin. *Journées nationales de géotechnique et de géologie de l'ingénieur* (p. 403- 410). Bordeaux.
- Schwarz, N., Cam, H. et Neithalath, N. (2008). Influence of a fine glass powder on the durability characteristics of concrete and its comparison to fly ash. *Cement and Concrete Composites*, 30(6), 486- 496.
- Shafaatian, S. M. H., Akhavan, A., Maraghechi, H. et Rajabipour, F. (2013). How does fly ash mitigate alkali-silica reaction (ASR) in accelerated mortar bar test (ASTM C1567)? *Cement and Concrete Composites*, 37(1), 143- 153.
- Shayan, A. et Xu, A. (2006). Performance of glass powder as a pozzolanic material in concrete: A field trial on concrete slabs. *Cement and Concrete Research*, 36(3), 457- 468.
- Shi, C., Wu, Y., Riefler, C. et Wang, H. (2005). Characteristics and pozzolanic reactivity of glass powders. *Cement and Concrete Research*, 35(5), 987- 993.
- Sprung, S. et Sylla, H. M. (1998). Course of the alkali/silica reaction in concrete with different types of aggregate. *Ciment, plâtre et chaux*, 51(6), 334- 345.
- Tagnit-Hamou, A. (2013). *Notes de cours - Liants hydrauliques*. Sherbrooke.
- Tagnit-Hamou, A. (2014). *Notes de cours - Microstructure et physicochimie des ciments et bétons*. Sherbrooke.

- Tagnit-Hamou, A. et Bengougam, A. (2012). The Use of Glass Powder as Supplementary Cementitious Material. *Concrete International*, (march), 56- 61.
- Taha, B. et Nounu, G. (2008). Properties of concrete contains mixed colour waste recycled glass as sand and cement replacement. *Construction and Building Materials*, 22(5), 713- 720.
- Taha, B. et Nounu, G. (2009). Utilizing Waste Recycled Glass as Sand/Cement Replacement in Concrete. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 21(12), 709- 721.
- Tognonvi, T. M. et Tagnit-Hamou, A. (2013a). Valorisation des sous-produits industriels dans le béton. *14e édition des journées scientifiques du RF²B* (p. 17- 28). Sherbrooke.
- Tognonvi, T. M. et Tagnit-Hamou, A. (2013b). *Valorisation of clean panel glass (CPG) in concrete*.
- Topçu, İ. B. et Canbaz, M. (2004). Properties of concrete containing waste glass. *Cement and Concrete Research*, 34(2), 267- 274.
- Xie, Z., Xiang, W. et Xi, Y. (2003). ASR potentials of glass aggregates in water-glass activated fly ash and portland cement mortars. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 67- 74.
- Yamada, K. et Ishiyama, S. (2005). Maximum dosage of glass cullet as fine agregate mortar. *Acheiving sustainability in construction: International conference at University of Dundee* (p. 185- 192). Dundee.
- Zachariassen, W. H. (1932). The atomic Arrangement in glass. *Journal of American Chemical Society*, 54, 3841- 3851.
- Zidol, A. (2009). *Optimisation de la finesse de la poudre de verre dans les systèmes cimentaires binaires*. Université de Sherbrooke.
- Zidol, A., Pavoine, A. et Tagnit-Hamou, A. (2012). Effect of glass powder on concrete permeability. *Inernational congress on durability of concrete*.
- Zidol, A. et Tagnit-Hamou, A. (2015). *Rapport d'étape sommaire d'une campagne d'essais visant à finaliser une fiche technique de la poudre de verre produite par Tricentris*.